

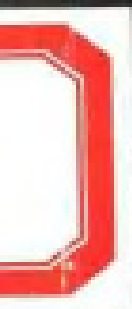


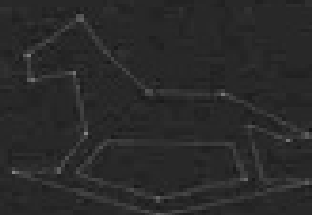
第一推动丛书(第3辑)

At Home
in the Universe

宇宙为家

[美] 斯图亚特·考夫曼 / 著 李绍明 徐彬 / 译 湖南科学技术出版社





“重要的新理论。”

——卡尔·萨根,《华盛顿邮报》

“一部大胆的作品……我敢保证,任何人在经过学院式的学习之后而想像力尚有留存的话,或者是那些未经此类训练的读者,读后定会获益甚丰,并永远被这本书所改变。”

——伊恩·斯图亚特,《自然》杂志

大家

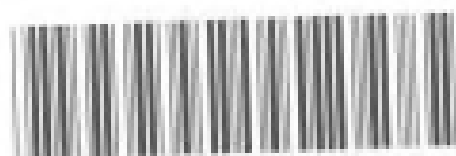
“自组织倾向理论中缺失的关键一环,是如何能将随机的和确定的进化力量结合起来,得出令人满意的有关生命秩序的理论。在这方面,考夫曼做出了最为卓越的贡献。”

——史蒂芬·杰伊·古尔德,著有《熊猫的拇指》

“有关宇宙中秩序的影响深远的新理论,讲述者是发展该理论的先驱人物。”

——《华盛顿邮报书评》

Q11-49
2K295



A1102433



第一推动丛书·第33册

At Home
in the Universe

宇宙为家

[美] 斯图亚特·考夫曼 / 著 李绍明 徐彬 / 译 湖南科学技术出版社



At Home in the Universe

© 1995 by Stuart Kauffman

Chinese translation copyright by Hunan Science & Technology Press

Published through arrangement with Brockman, Inc.

湖南科学技术出版社通过美国 Brockman 公司获得本书中文简体版中国大陆地区出版发行权。

版权所有，不得侵犯

著作权合同登记号：18 - 2000 - 89

《第一推动丛书》第3辑

宇宙为家

著 者：[美] 斯图亚特·考夫曼

译 者：李绍明 徐 彬

责任编辑：吴 炜 陈 刚

出版发行：湖南科学技术出版社

社 址：长沙市湘雅路280号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系：本社直销科 0731—4375808

印 刷：深圳市彩帝印刷实业有限公司
(印装质量问题请直接与本刊联系)

厂 址：深圳市福田区车公庙天安数码城F3.8栋2楼C D座。

邮 编：518034

出版日期：2003年5月第1版

开 本：889mm×1194mm 1/32

印 张：12.25

插 页：2

字 数：290000

书 号：ISBN 7-5357-3687-4/N·108

定 价：29.00元

(版权所有·翻印必究)



总 序

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比较起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难地进步，这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。



正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人志士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知做了艰苦卓绝的奋斗，中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而应该说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是在这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了，但是，毋庸讳言，在一定的范围内，或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的后果的接受和承认，而不是对科学的原动力、科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上是不隶属于服务于神学的，不隶属于服务于儒学的，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化和地域的差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是为了传播科学的精神，科学的思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到



倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步做一点推动。丛书定名为《第一推动》，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴含在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现，自身如何成为自身的主宰。

《第一推动丛书》编委会



序 言

我们生活的世界上，充满着令人惊叹的生物学复杂性。各种各样的分子合在一起跳代谢之舞，终于造出细胞来。细胞跟细胞交互作用，形成生物；生物与生物交互作用，形成生态系统，形成各种经济形态和社会形态。那么，这一伟大的建构自何而起呢？百多年来，科学只给了一个说法，来解释这种有序状态的起源，那就是自然选择说。达尔文教导我们，众生芸芸，随机发生突变，自然选择大浪淘沙，偏留那些有用的、凤毛麟角的佼佼者，生物的世界子是进化不息。根据这种生命史观，生物体乃是东拼西凑而成的洋玩意儿，造作者就是那个不声不响的、机会主义的补锅匠——自然选择。这样一来，科学就把我们置于一种可怜的境地：我们原来是一场不可思议、没有可能发生的事故，我们背后，则是那冷漠的巨大时空。

30 年的研究，终于让我相信，关于生物的这一主流观念是不完全的。我在本书中就是要论证，自然选择固然重要，可是，自然选择并不是单打独斗，就制造出了生物圈的一切一切，从细胞到生物体到生态系统，这一整个漂亮的建构。我要说，在此之外，生命还有另一个源头，那就是自组织：那才是有序状态的根源。我终于有了这样的信念：生物世界的秩序，不仅仅是零敲碎打地做出来的。那是由于自组织的那些原理自然、自发地生出来



的。那些复杂性原理，我们才刚刚揭示出来并加以理解。

过去 30 年的科学的主流是还原论的，那就是试图把复杂的系统割裂成简单的部分，然后，这些部分再割裂成更简单的部分。这个还原论的程序获得了令人瞩目的成功，往后还会一如既往成功下去。可是它也留下一个空白：我们如何利用我们搜集到的关于那些部分的知识，来建构一个关于整体的理论呢？这里的深层困难在于，那个复杂的整体可能表现出一些品性，不大容易用关于部分的理解来解释。可以毫不玄虚地说，那个复杂的整体，常常会表现出一些集体的品性，这些品性是“自发产生的”，合理合法，天经地义。

本书描述我本人关于复杂性原理的一些探索，就是在这些原理的作用下，一道分子汤里产生了生命，最终进化出我们今天见到的生物圈。不管我们谈论的是分子和分子如何协作组成了细胞，还是生物体跟生物体如何协作组成了生态系统，还是买方与卖方如何协作组成了市场和经济形态，我们都会发现一些理由使我们相信，光有达尔文主义是不够的；相信我们今天看到的世界不仅仅起源于自然选择。在这个活生生的世界的制造过程中，自然选择始终是外力，作用于一些表现出自发秩序的系统之上。假如我是对的，那么，这个深层的秩序，经过了自然选择的删削，会给我们争得一席之地：我们不是什么不可思议的东西。我们是足月分娩、注定要降临的。这个重新认识的世界，是我们理所当然的家园。

圣塔菲研究院，新墨西哥 S. K

1994 年 10 月



鸣 谢

我要感谢本书的编辑乔治·约翰逊。没有他的编辑加工，这本书根本就写不出来。他是一个很好的科普作家，《纽约时报》的编辑。在帮我弄《宇宙为家》的时候，他正写着自己的一本书，叫做《心中的火：科学，信仰和对于秩序的探索》。起初，我俩常在圣塔菲研究院的拉波萨达馆共进午餐。餐桌上，我们一起勾画出这本书的骨架。我提出，我很乐意跟他共同署名。他拒绝，觉得《宇宙为家》应该是我自己的书，是一个头脑关于方兴未艾的复杂性科学的思考。我听乔治的，这还不是最后一次。每隔一周或两周，我俩都要在拉波萨达见面，不然就去爬圣塔菲研究院后面的高山。爬到离大草原两道冈就往回返，以免遭到阿帕彻人的袭击。餐桌上，山道上，我们一章一章地谈。作为回报，我引导乔治发现采蘑菇的乐趣。他有本事第一次尝试就找到了许多可爱的牛肝菌，比我找的还多。然后，我就回到自己的写字间，坐在键盘前，和着所有写书人都有的标准的热情、标准的痛苦，把想好的一章挥洒在电子的页面上。出来产品，就拿给乔治，由他砍，由他磨，由他笑。每一次，我都听他温婉的要求，这里截短些，那里抻长些，如是六轮儿，但见我可爱的书渐渐有了模样。写作是我的，声口是我的，可是，这本书另具一种清晰、另具一种结构，这清晰，这结构，却不是我一个人能办的。有乔治相助，我深感荣幸。

作者简介

斯图亚特·考夫曼供职于圣达菲研究院。身为麦克阿瑟学会的研究员，他是自组织理论和复杂性理论在生物学上的应用方面的前沿思想家。著有《秩序的起源：进化中的自组织和自然选择》等书。

第一推动丛书（第3辑）

宇宙为家

译者简介

李绍明，男，1956年生于山东高密。现任山东大学外国语学院英语副教授。译作有《细胞生命的礼赞》、《水母与蜗牛》、《摄影大师500经典巨作》、《祭司与王制》、《欧罗巴的黄金时代》；著有《大学英语写作》；编有《英语散文名篇欣赏》等。

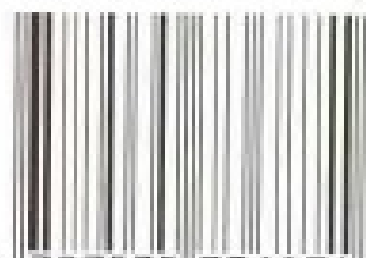
徐彬，男，教师，IT撰稿人。就职于山东师范大学外国语学院。

At Home in the Universe

□责任编辑/吴炜 陈刚

□装帧设计/谢颖

ISBN 7-5357-3687-4



9 787535 736871 >

N·108 定价: 29.00元



目 录

> 第一章 宇宙为家	1
创 世	10
生命的法则	19
免费的秩序	29
要智慧，不要力量	36
> 第二章 生命的起源	39
关于生命的理论	40
生命的成形	55
> 第三章 注定要来的我们	58
生命的网络	59
一个化学的创世说	67
反应网络	70
中心思想	75
给反应加油	81
一种顽固不化的总体论	84
> 第四章 免费的秩序	86
自我平衡的源泉	90
秩序的必备条件	98



混沌的边缘	105
第五章 个体发生学之谜	114
雅各布，莫诺和遗传回路	117
选择是秩序的惟一来源吗	119
个体发生学里的自发秩序	121
小小的吸引子，大大的秩序	125
最终理论之梦	137
第六章 诺亚方舟	139
生物学大爆炸	142
超临界汤	146
诺亚试验	151
创新的雪崩	156
第七章 应许之地	161
实用分子进化学	163
万用分子工具箱	174
随机化学	178
实验室创造生命	181
第八章 高地探险	183
高地探险	183
地球上的生命	193
基因型空间和适应性环境	199
相关适应性地形	206
复杂地形上的进化	214
以上帝的目光俯瞰	219
自然选择的局限	223
自组织、自然选择和可进化性	226



第九章 生物体和工艺品	231
跨越进化地形	233
寒武纪物种大爆炸	240
复杂地形上的技术进化	243
学习曲线	245
第十章 台上一点钟	249
群 落	252
共同进化	259
耦合适应性地形	271
沙堆和自组织临界状态	284
第十一章 寻找完美	296
分片模式	299
分片过程	305
混沌的边缘	311
分片可能性	319
基于接受者的优化，有时无视某些“客户”的反映	322
分片政治	325
第十二章 方兴的全球文明	328
炼金术	331
技术共同进化	336
随机语法	341
蛋、喷射器和蘑菇	345
技术共同进化和经济起飞	348
全球文明	358
重塑神圣	363
译后记	367



第一章 | 宇宙为家

我的窗外，圣塔菲之西，绵延着新墨西哥北部那超凡脱俗般的景物——深峪，方山，圣地，里约格兰特——那是北美最古老文明的家园。如此丰富，如此古意，如此摩登，遥远的往昔和随后的千年在这里杂陈、交融，因有所企盼而微醺。65 千米之外，横亘着洛斯阿拉莫斯。那里，辉煌的头脑，亮丽的天光，一直沉睡不醒，直到半个世纪前，1945 年：当年谁也没有想到，这里会成就今天的人文。稍远处，伸展着格兰特山谷，那是一座古山的残迹，据说那山原来有 1 千米之高，后来山头崩去，把灰烬洒落在阿肯色大地，留下一方黑曜岩在岁月和风雨中消磨。

几个月前，我邂逅甘特·马勒(Gunter Mahler)，跟他共进午餐。他是一位理论物理学家，从慕尼黑来访圣塔菲研究院，因为这儿有我们这帮子同行在研究复杂性原理，那些原理将解释我们周围冒出的种种奇异花样。甘特面北，目光透过矮松和刺柏，望着遥远的科罗拉多，冷不丁地问我，你以为天堂的乐园是什么样子。没等我想出答案，他倒先提出一个：不是高山，不是海岸，亦不是一马平川。他说，莫不就是眼前这样伸展的高原，艳阳照耀下起伏无边，优雅的地形地貌镌刻着地质的纪年，滚滚奔向远山勾出的天际线。出于一些我不甚明白的理由，我想他是对的。我俩很快陷入冥想，思想起东非的景物来，纳闷儿我们不会竟



然带有某种遗传的记忆，冥冥中还记得我们的出生之地，我们的伊甸，我们最初的家园。

我们是怎样述说着自己的故事，怎样讲述我们的起源和终结，我们的形成和变迁，讲述我们的上帝，言语和律条。地无分南北，时无分古今，人无分黑黄，一定都编造过一些神话，勾画出我们在太阳底下的位置。古老的克罗马努人留下的动物画，已经不只是简单的线条和形状，而是透露着敬畏之心，这种敬畏与随后几千年的敬神之心相比有过之而无不及：那一定是在费尽心思回答着这样一些问题：我们是谁？我们来自何方？我们来此何干？这些问题，尼安德特人^①问过吗？能人^②问过吗？直立人^③问过吗？过去 300 万年的进化途中，这些问题第一次生发在怎样的篝火旁？没人知道。

在进化途中的某个地方，天堂的乐园失去了，迷失在西方人的头脑里，迷失在传播日广的世界文明里，迷失在我们集体的思维里。约翰·弥尔顿(John Milton)^④曾经在那些笼罩摩登时代的

① 尼安德特人(*Homo Sapiens Neanderthalensis*)，灵长目人科动物，生活在更新世晚期，分布在欧洲、亚洲等地，生活在温带和寒带的气候下。尼安德特人身矮，肌肉厚实，有突出的眉脊骨和后缩的额和下巴。体型可能是长期适应气候的结果。脑与现代人脑的大小差不多，捕猎，制作复杂的木和骨的工具，使用火，掩埋尸体。在最后冰河时期生活在欧洲和西亚。——译者注

② 能人(*Homo Habilis*)，灵长目人科，俗名为早期人类，已经灭绝。生存时代为上新世晚期—更新世早期，分布在非洲，化石遗存发现于坦桑尼亚奥杜威峡谷地层的第 I 层和第 II 层。能人比任何更早的人类颅更大，更圆。门牙相对大，前臼齿很小。臼齿很浅，并有厚厚的珐琅质。能人这一学名是利基、托拜厄斯和内皮尔三人在 1964 年共同确定的。——译者注

③ 直立人(*Homo erectus*)生活在距今 200 万年前—20 万年前，地质年代为更新世早期至中期，考古期属于旧石器时代。——译者注

④ 约翰·弥尔顿(John Milton, 1608. 12. 9 ~ 1674. 11. 8)英国伟大诗人，地位仅次于莎士比亚。他的著作和影响在英国文学、文化与自由思想的历史中占有重要地位。以长诗《失乐园》闻名于世，他对撒旦形象的塑造为世界文学最高成就之一。其散文作品对清教徒革命做出重要的解释，在西方政治和宗教思想史中占有地位。

《失乐园》(*Paradise Lost*)(1667)是最后一部伟大的英国史诗。该诗以人类的堕落为主题，成功地刻画了贯穿全诗的堕落的天使撒旦。——译者注



早期岁月里苦苦地为上帝怎样对人而寻找理由，他一定算得上西方文明造就的最后一个做这种追寻的卓异的诗人了。乐园失去了，没有丢失在罪孽里，却是丢失在科学里。曾经一度，仅仅数百年前，我们西方人还相信，我们自己是上帝的选民，是照着他的样子造出来的，在一个因他的爱而创造的世界里行他的言教。而今，不过 400 年之后，我们却发现自己生活在一个小小的星球之上，这个星球处于一个稀松平常的星系的边缘，这样的星系有数十亿个，以百万秒差距^①散布在一个由大爆炸形成的巨大时空穹隆的周边。我们被告知，我们只是一场事故。什么目的啦、价值啦，都成我们自己的事了。没有了撒旦，没有了上帝，这下子，宇宙成了物质的中性家园，幽也好，明也好，都是绝对不仁的。我们依旧忙忙碌碌地过活，可过活于其中的世界已非复故家了。

科学的兴起和随之而来的技术爆炸已驱使我们采取了如今这种世俗的世界观，这件事我们当然已经接受了。可是，精神的饥饿依然存在。最近，在新墨西哥开了一个小型会议，意在探讨人类面对的一些基本问题（好像一小撮思想者能办成什么事儿一样）。会上我见到了普利策奖得主、土著美国作家 N·司各特·毛马代(N. Scott Momaday)。毛马代告诉大家，我们面临的中心问题，是如何重新发明神圣。他讲了一个圣盾的故事，那是凯欧瓦人的荣誉武士在战斗中手持着的，通过那武士的流血牺牲而成为圣物。内战以后，凯欧瓦人跟美国骑兵打了一仗，圣盾随即失窃。他告诉我们，圣盾新近找到了，并物归原主——原先取走圣盾的那个人士内战后升为将军，圣物就是在他的老家找到的。毛马代讲述着他的人民如何迎接圣物、那圣物又是如何重要的时候，深沉的话音轻轻地，静静地，凄凄地，不动声色、满怀敬意

① 1 秒差距 = 30 万亿千米



地朝我们落下来，是感情和苦难在他口中升华。

毛马代关于寻求神圣的动议深深地印在我心里，因为我抱着一个希望，希望那些呼唤关于复杂性科学的东西会帮助我们找到自己在宇宙中的位置；希望借助这一新的科学，我们能找回自己的价值感，神圣感，就像凯欧瓦人最终找回圣盾一样。同一个会议上，我提出，人类面对的最重要的问题，乃是一个世界文明的出现，是它的深远许诺，还有这一变迁将会引起的文化错位。一个多元化的地球村正在形成。要从根柢上加强这个共同体，我认为我们需要有一个更加阔大的心智基础——一种新的思维来认识我们的起源、进化、生命的深度自然性，还有它千变万化的展开形式。本书就是要探讨这么一个思维。因为，我们将会看到，复杂性科学的出现将会为一个多元化的民主社会提供新的支持，提供证据，说明那样一种社会将不全是人的创造，而是势所必至、理所当然的。人们总是审慎地从最基本的原理推导出他自己所在社会的政治秩序。19世纪哲学家詹姆斯·穆勒(James Mill)曾经成功地从一些基本原理推导出，君主立宪制，特别是像19世纪英国那样的君主立宪制，乃是最高的、自然的政体。但是，我想阐明，我和我的同事们正在追寻的复杂性原理本身，就意味着，民主制也许是迄今进化出来的最适宜的机制，借助这个机制，可以在种种互相冲突的实际利益、政治利益和道德关注之间达成可能达到的最佳妥协。另外，毛马代或许也是对的。我们可能也需要重新发现神圣——就是这种关于我们自身深远价值的感觉——而将它植根于新文明的内核之中。

失乐园的故事人人皆知，但还是值得重提。哥白尼(Copernicus)之前，我们相信自己处于宇宙的中心。而今，我们自诩高明，对于企图压制日心说的教会白眼相看。我们说，我们为知识而知识。当然，这是对的。然而，难道教会对于道德秩序破坏的关切真的仅仅是出于狭隘的虚荣吗？对前哥白尼时代的基



基督教文明来说，地心说并非仅仅事关科学。相反，它是一块作证的基石，证明整个世界围绕我们而转。有上帝与天使，人与兽，还有为我们的福利而生的繁茂的草木，有日月星辰在我们头顶轮转，于是我们知道自己的位置：是在上帝造物的中心。教会有理由害怕，哥白尼那个学说最终会拆碎存在了千年之久的权利与义务、责任与角色的统一体，拆毁那座道德的室庐。

哥白尼把他的社会捅了个大漏子。伽利略(Galileo)和开普勒(Kepler)也没帮多大忙，特别是开普勒，他只不过证明了，众行星围绕一个椭圆的轨道运转，而不是像亚里士多德(Aristotle)预见的那样，围绕一个完美的正圆运转。开普勒可真是个顶宝贝的过渡人物：他原是占星术传统、或者说前一个世纪星相家的嫡传。他寻求的本来不是椭圆，而是一些可与柏拉图(Plato)试图用来构建宇宙的那五个完美固体相称的和谐轨道。

后来，来了我们所有人的大英雄牛顿(Newton)，他逃避了旧说的折磨，却把俗人们弄到一个更加远离天堂乐园的世界里受罪。他跨出了怎样巨大的一步呵。想想看，当牛顿的新的机械观在他心里形成之时，他会是何等的感觉。他一定感到了怎样的惊奇呵。只不过有区区三个小小的运动定律和一个引力定律在手，牛顿就不仅生发出潮汐和轨道，还为西方人的头脑开动了—一个钟表般的宇宙。牛顿之前，一个经院哲学家会确知，箭会沿弧线飞往目标，因为亚里士多德教导说，有一种神秘的力不断地作用于它。所以他会很容易相信，其他万物也都因上帝不停地关照而运行。这样的上帝，假如施为得法，就会照拂某一个啦。这样的上帝兴许会把他送回乐园。可是牛顿之后，光有定律就够了。宇宙可能由上帝上足了发条，再松开手，然后就任由它随着上帝制定的法律的展开而不可避免地嘀嘀嗒嗒走向永恒，再也不需要进一步的干预。爱动脑筋的人们越来越感觉到，如果星辰和潮汐可以不因神的干预而运动，那么，在人类自己的事务上就很难指



望神来干预喽。

然而还是留下了些许的安慰。假如说，行星和所有无机物都遵从那些永存不朽的法律，那么，还有活物呢？那根由所有活物组成的伟大链条，有人这东西高高在上坐在顶端，这总能反映上帝的旨意吧。那些活物的名字还是亚当给起的呢：什么昆虫啦，鱼啦，爬虫啦，鸟啦，哺乳动物啦，还有人。教会本身还有等级呢：最底下是俗众，然后是神父，主教，大主教，教皇，圣人和天使：这又是一个伟大的链条，从低到高，直到那位万能的神。

可是哎呀呀，达尔文来了，弄出个通过自然选择进化的理论，把这一切全毁了！我们这些达尔文的传人，虽然早在一百多年前就被教会了分科分种来看生物界，可至今还在为个中的含义而大伤脑筋：人这东西不过是一连串随机突变的产物，把我们筛选出来的那种定律，一点也不比适者生存更高明。20世纪后期美国出现的创世说并非偶然。它的倡导者坚守着它，那是在未雨绸缪，提防着那个可怕的道德含义：既然人不过是比5亿年前寒武纪大爆炸^①还要早些的最后一个共同始祖随机分出的一个支脉，那么，道德的意义又何在呢？当然，所谓的创世说根本就不是科学，可是，其中的道德苦恼当真就那么愚蠢吗？或者，创世说还值得我们更加同情，因为它尽管弄错了方向，可还是我们这个世俗世界寻求恢复神圣事物的广阔努力的一部分？

达尔文之前，所谓的形态学家们还能在一种观念里找到安

① 大约5亿~6亿年前，在地球学家称为寒武纪的开始之时，绝大多数无脊椎动物在短短几百万年内出现了。起先是寒武纪初小壳化石的爆发性发展，继之被大型带壳动物取代。是什么原因使得早期寒武纪世界能够激发这样的生命“爆发”？长期以来这是古生物学研究中的一大难题。古生物学家为此做出大量的努力，或许是因为大气中积累了足够的有利于呼吸作用的氧；全球环境变化有利于原生动物的生存；海洋化学物质的变化积累了大量的磷酸盐，使得软体动物有可能演化出保护性的骨骼；生态学理论及其相互捕食关系的理论对此也做出了解释。——译者注



慰：物种不是随机突变和选择的结果，而是无限久远的形态法则的产物。18世纪和19世纪初叶顶好的生物学家把各种生命形态作比较，根据林奈(Linnean)的分类学把它们分成归属于一套等级体系的一个个范畴，这套等级体系我们至今沿用，那就是种、属、科、目、纲、门、界。对于那时的生物学家，这种等级制既是天然的，又是命中注定、阖宇宙皆然的，就像天主教会那个伟大的等级制链条一样。如有形态学上的重合现象，那些科学家就会寻求一些合法的解释，说明它们何以相同，何以不同。有一个类比可以帮助我们理解这一做法：我们可以想一想那些结晶体——它们只能以某种既定的形式而存在。面对那些一成不变、然而又是高度相似的物种，目的形态学家们试图找到类似的规律性。当然了，鱼的胸鳍，海鸥翅膀的骨骼，疾走如飞的马腿，无不是同一深刻法则的表达。

可达尔文毁了这个世界。物种不是一成不变地套在林奈的框框里的。它们是一个一个依次进化来的。造成肢体或鳍的相似性的，不是上帝或目的形态学的那些法则，而是作用于随机的变异之上的自然选择，因为各种生物对它们的环境有惊人的适应力。根据今天的生物学家的理解，这些想法的含义，把人连同其他生命形态一道改变了：从造物主的作品，沦为一些归根到底是历史事故的产物，起作用的就是那个机会主义的进化。“进化就是撞大运”，生物学家雅克斯·莫诺(Jacques Monod)这样说。跟莫诺共享诺贝尔奖的法国遗传学家弗朗索瓦·雅各布(Francois Jacob)也应和道，“进化嘛，就是个敲敲打打拼凑洋玩意儿的白铁匠。”在犹太-基督教的传统中，我们已经习惯于认为自己是贬落凡间的天使。落凡天使这个角色还不算坏，至少还有些希望赎罪、蒙恩，顺着云梯爬回天堂。可是，进化论却把我们粘在了地上，没有什么云梯好往上爬，只有苦思冥想，把自己的命运比作



鲁布·戈德堡^①的机械装置在大自然中的翻版。

随机变异，自然筛选。这就是核心，这就是根源。那种令人气短的事故感、历史偶然感和除莠设计感尽在此中。物理学的计算诚然是冷酷的，但至少还隐含着某种深层的秩序，某种宿命。可是，生物学却越看越像是关于意外、关于特别事件的科学，而我们只不过是这类特别事件结出的一个果子。我们常说，假如把带子重放一遍，生物体的形式一定会大不相同。我们这种不知怎么给抻弄捏造出来、乔装打扮得人模人样、自吹自擂惟我独尊地存在于地球之上的东西，压根儿就没必要出现。别再装模作样自命不凡了；兴头了这么久也够运气了；还天什么堂。

那么，这一切秩序，这一切芸芸众生，到底从何而来呢？我的窗外，忙忙碌碌编织她前尼龙时代的生计之网的蜘蛛；机灵地越过山梁的那匹郊狼；泥泞的里约格兰特河谷里那些攘攘扰扰的君不见（一种傍晚出来的肉眼看不见的小咬），它们到底从何而来呢？达尔文之后，我们求助于一个独一无二的力量，自然选择，我们应该大写它，因为它几乎就是我们新的神明。随机变异，自然筛选。没有它，我们可以设想，这片地儿除了乱糟糟的无序，什么也不会存在。

本书里我想争辩，这个想法错了。因为我们将会看到，方兴未艾的复杂性科学已经在告诉我们，秩序并非完全是偶然的，告诉我们，自发秩序的来龙去脉就在我们手边。复杂性原理自发地产生出自然界的大部分秩序。只是在此后，自然选择才起作用，

① 鲁布·卢修斯·戈德堡(Rube Goldberg, 1883~1970)是美国漫画家，他画了许多实际很简单却用很复杂的方法做的小事情，赢得了许多读者。比如一个人从厨房桌子上拿起晨报便发动了一个打鸡蛋的装置：拿起晨报的同时，这个人牵动了一条打开鸟笼的线，鸟被放出来，顺着鸟食走向一个平台。鸟从平台摔到一罐水上，把水溅到花上，花倒了，使手枪开火。猴子被枪声吓得把头撞在系在剃须刀上的杯子上，剃须刀切入鸡蛋，打开了壳，使鸡蛋落入一个小圆碟内。——译者注



对已有的形态做进一步的塑造、打磨。过去，对于自发秩序的来龙去脉人们并不是一无所知，可是，只有现在，这些来龙去脉才渐渐显得像是生命起源和进化的强大的新线索。我们都知道，一些简单的物理系统会表现出自发的秩序：一小滴油滴在水上，会形成一个圆形；雪花呈现出轻盈的六重对称。这些并不新鲜。新鲜的是，自发秩序的范围远比我们从前想到的大得多。一些巨大的、复杂的、看上去随机的系统中，已经发现存在深层的秩序。我相信，这种自然发生的秩序不但是生命起源的基础，也是今天我们看到的生物界许多秩序的基础。我的许多同事也是这样，他们也开始在所有不同种类的复杂系统中找到了这种自发秩序的证据。

对于达尔文以来我们在生物学方面的成见来说，自发秩序的存在构成了令我们瞠目结舌的挑战。百多年来，大多数生物学家一直相信，自然选择乃是生物方面有序状态的惟一起源，相信自然选择是打造生命形式的惟一工匠。但是，如果自然选择从中进行的那些形式是由复杂性的规律产生的，那么，自然选择自始至终都应有一个侍女跟她相伴。自然选择终归不是秩序的惟一来源，而生物也不仅仅是敲敲打打做出来的洋玩意儿，而是更深层自然规律的表达方式。假如所有这些都是真的，那么，我们面前该展现出怎样一个跟达尔文世界观大异其趣的修正！我们不是偶发的事故，而是足月分娩，注定要来的。

修正达尔文的世界观可没那么容易。迄今为止，生物学家们还没有一个用以研究进化过程的概念性框架，能把自组织和自然选择两者糅合起来。自然选择是如何作用于一个已经在产生着自发秩序的系统的？物理学当然自有其深邃的自发秩序，可是它不需要选择。生物学家私底下知道有这么个自发秩序，可仍然视而不见，一个劲儿地只盯着选择。由于没有一个框架来涵容自组织和自然选择，自组织就始终落得个被人忽视的下场，像是格式塔绘画里的背景。可是，视线蓦然一转，原来的背景会变成前景，



原来的前景，自然选择，又会变成背景。生命及其进化一向依赖于两个方面的协力合作，一方面是自发的秩序，另一方面是自然选择对这一秩序的修饰。少了哪方都不成。我们需要绘制一张新的画图。

创 世

19世纪遗留下来的两个概念相互连接，完成了我们关于星群涡漩、众星散落的概念。除了达尔文，还有热力学和统计力学，从法国工程师萨迪·卡诺(Sadi Carnot)的学说，到物理学家路德维希·玻耳兹曼(Ludwig Boltzman)和乔赛亚·威利亚德·吉布斯(Josiah Willard Gibbs)的理论，都给了我们一条看上去神秘兮兮的热力学第二定律：在平衡的系统中，也就是在那些对物质和能量交换关上大门的系统中，无序状态的量度——称作熵——要不可避免地增长。我们都见过这样的简单例子。一小滴深蓝色的墨水滴在一碟子静止的水里，会化成一汪均匀的淡蓝。墨水再也不会凝集回来，成为原来的一滴。

玻耳兹曼让我们对第二定律有了更摩登的理解。想一想，有个盒子，装满了气体的分子，这些分子都是些硬邦邦的弹性小球。那些分子既有可能全都聚集在盒子的一角，也可能多少均匀地分布开来。这两种情况的可能性都不太大。其他什么情况都可能存在。但是，多多少少均匀分布的可能性，比所有分子都挤在一个角上的可能性要大得多。玻耳兹曼论道，平衡系统中熵的增长没什么奥妙，只不过是所有可能的随机安排中那种统计学上的倾向（所谓虚拟机会均等）而已。在大多数情况下，那些气体分子就是会均匀分布。所以嘛，就出现了我们见到的样子。墨水滴化开而不再凝集成一滴；气体分子散开而不再集中到一角。一个系统，若不受到干预，就会尝试所有可能的微观细粒构形，尝试



每一种构形的机会都是均等的。但是，该系统会在那些由非常大量的细粒构形所满足的粗粒构形中停留得最久，那就是，气体分子均匀地散布在整个盒子里。所以嘛，说来说去，第二定律也没有什么神秘的喽。

第二定律造成的后果是，在平衡的系统中，有序——这种所有安排中最不可能的安排——会消失。如果把有序定义为只与那些细粒状态（分子在左上角集中，分子在与盒子顶平行的平面上排好）相应的那些粗粒状态，那么，在热力学平衡中，那些脆弱的安排就会因系统机会均等地游弋于所有微观状态而消失。由此推论，有序状态的维持，要求对该系统做某种形式的功。没有功，秩序就会消失。于是我们就得出现在流行的观念：秩序的不连贯的崩坍，乃是事理之本然。又来了：我们这种东西到底还是不可思议的、偶然的故事。

人们一直认为，热力学第二定律未免阴郁。你几乎能想象得出那些个严重的大标题：宇宙江河日下。热死就在前方。无序就是司命的阎王。本来我们是上帝的爱子，处于宇宙的中心，在一个叫做伊甸的园子里，在为我们的利益而创生的造物中间晃来晃去。是科学，而不是罪孽，让我们失去了乐园。

假如说宇宙会因第二定律而江河日下，那么，从我窗外的景象中可看不到很多证据：诚然，这里那里有点点垃圾；我这个恒温动物在散发一些热量，扰乱着空气的分子。然而，不是熵，而是了不起的向着有序奔涌的浪潮让我动心。树木从远在8光分（1光分约为 1.8×10^{10} 米）之外的一个星球抓取阳光，把它的光子跟寥寥几种配料——水和二氧化碳——搅在一锅，做出了糖和其他更加玄乎的碳水化合物；豆类从攀附在其根部的细菌那儿吸取营养，做成了蛋白质。我贪婪地吸入这些光合作用产生的废气，就是氧气——它可是古时候世界上最毒的毒素，那时候是厌氧菌的一统天下——呼出二氧化碳来喂养那些树。我们营造了周围的生



物圈，生物圈反过来又维持我们的生存，截取来自太阳的能量之流，编织出包被整个世界的伟大网络来进行生化的，生物的，地质的，经济和政治的交流。去他的热力学。创世，不管是亏了什么样的上帝做出来的，毕竟发生了。我们来了，并且兴盛地活着。

地球上生命的最早迹象出现于 34.5 亿年前，那是地壳冷却到足以支持液态水之后 3 亿年的事情。这些生命迹象可不能算是小事。形态完好的细胞，或者说专家们认作是细胞的东西，见之于那一时段的古老岩石里。图 1.1 显示的就是这样一些古老的化石。图 1.2a 显示类似的蓝菌化石，那是 21.5 亿年前的遗存。两

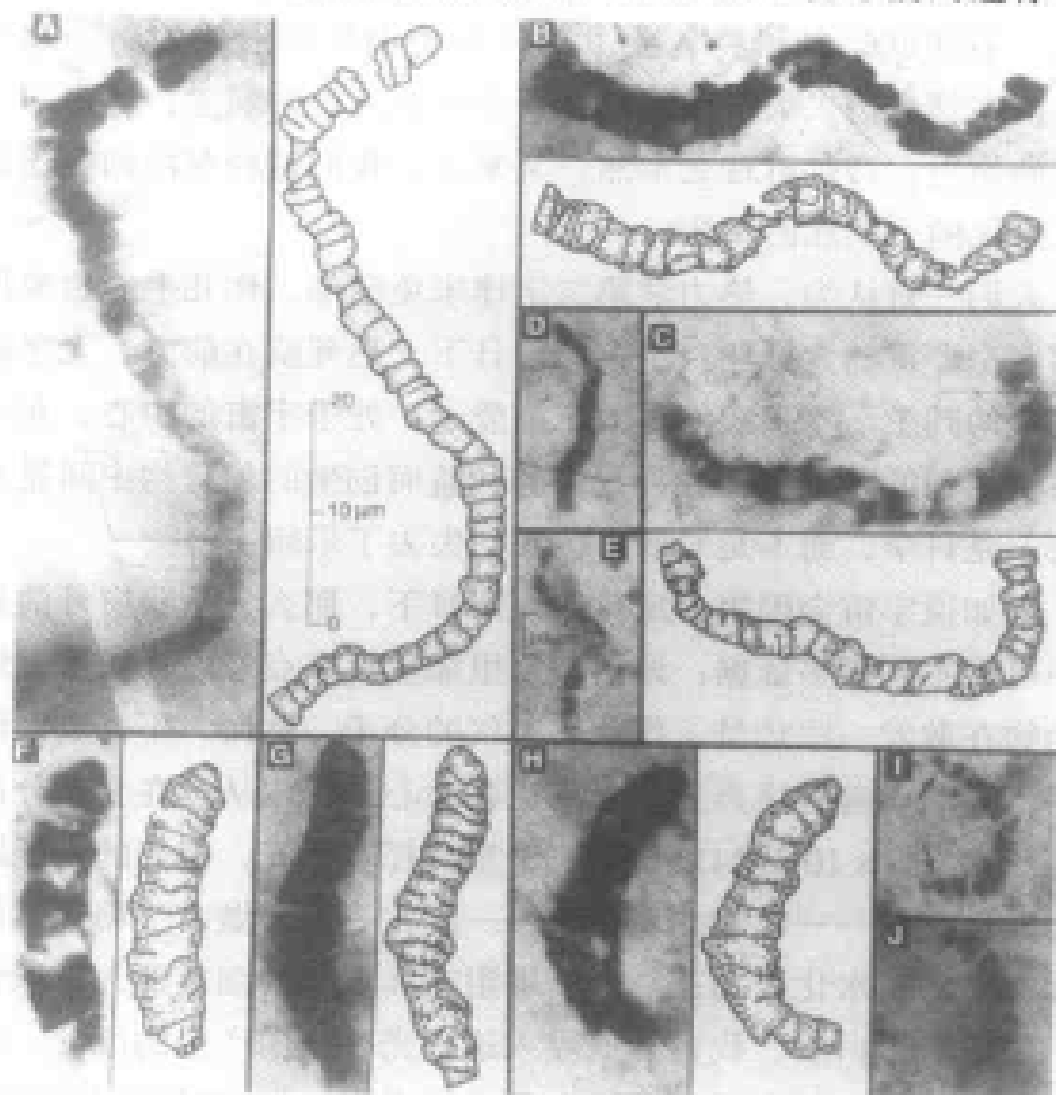
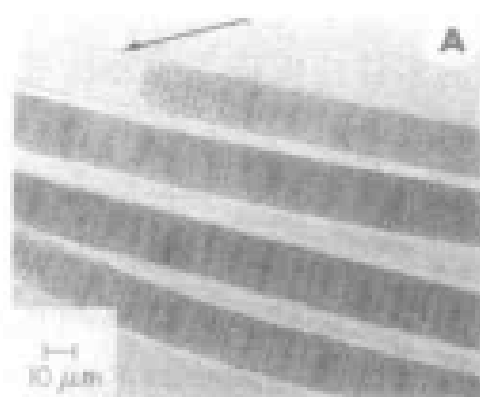
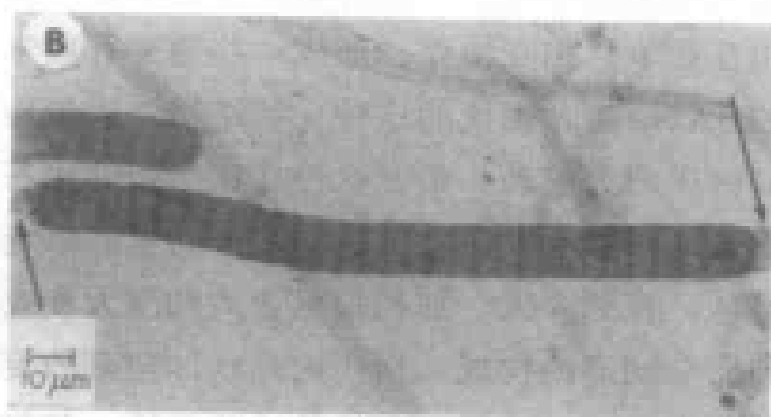


图 1.1 这是我们共同的祖先,34.65 亿年之前的生命的化石。每幅照片都附有艺术家手绘的图样。(感谢 J·威廉·肖普夫提供图片)



a



b

图 1.2 远古的细胞化石和现代活着的细胞之间有惊人的相似之处。a. 活着的蓝菌（球状藻青菌）群落。b. 在加拿大发现的有 2.15 亿年历史的蓝菌群体化石。（感谢 J·威廉·肖普夫提供图片）

者之间的形态学相似性是令人惊讶的。这些古老的细胞似乎有层细胞膜，把自己的内部环境跟外部环境分隔开来。当然，形态学上的相似性并不说明生化的或代谢的相似性，但是，当我们看着这些化石的时候，我们还是有一种悚然而惧的感觉：我们像是看到了万物之祖的某些印记。

细胞无疑是某种形式的进化——从最早的分子相互作用之网中演化而来——的胜利顶峰。这种形式复杂到足以显示我们称之为生的品性：能代谢，能繁殖，还能进化。反过来，前细胞生命本身也已经是了不起的胜利了，那是某种形式的前生命的化学演



进，从原始地球气云里分子种类的有限多样性演进到加强的化学多样性，这种加强的多样性保证了生命的成形，也就是保证了自我复制的分子系统的成形。

可是，细胞发明出来之后，一种麻木怠惰的状态马上就降临到我们祖先的头上。起先的细胞想必跟当时的古细菌有亲缘关系，后来变成长长的管状细胞，像是早期真菌的前驱，然后，似乎形成了某种像是简单的单细胞生物的球形的自治存在——这种形态到此便停顿不前，持续了相当沉闷的 30 亿年。这些后来一切生态系统的前驱们形成了一些区域性经济形态，其中，各种细菌和藻类相互竞争、相互协作，形成一些通常有数米方圆、数米高的复杂的丘状结构。当代的这种丘状结构，大量地见之于澳大利亚东北部海岸的大堡礁一带。这种丘状结构的化石版本称作基石（stromatoliths）。可以想象，这些简单的生态系统当年曾经盖遍了整个地球。直到今天，加利福尼亚湾和澳大利亚的浅海水域中还能见到完全同形的构成。当代的丘状体包藏数百种细菌，还有寥寥几种藻类。人们猜想，古代的丘状系统，其复杂性应该与之相当。

这种单细胞生命形式独力支撑着生物圈，大概支撑了 30 亿年之久——那可是地球生命的绝大部分时间。可是，生命形式注定要发生变化。变化的原因很难说，有着极其丰富的可能性。是像几十年来生物学家们争辩的那样，单单由于达尔文的机遇和选择吗？还是像我在本书中将要提出的那样，是自组织原理跟机遇与必然性共同作用的结果？到了大约 8 亿年前，多细胞生物出现了。这种多细胞生命的成因至今尚不明了，尽管有些研究者相信，某种原始的管状真菌开始形成内壁把自己隔开，这些隔开的小室后来成了一个个单独的细胞。

到了 5.5 亿年前的寒武纪，生命形式来了一次大爆炸，好似地狱之门豁然大开，妖魔鬼怪纷纷出笼。进化的创意突然迸发，



如今所有门类的生物，天上飞的，水中游的，地上走的，地底爬的，挨挨挤挤于每一个犄角、每一道缝隙，天涯海角无处不是，甚至数百米之下的岩石里都有的生命，似乎一下子创生出来。就缺了我们的直系祖先脊椎动物，那要到稍晚些时候的奥陶纪才会出现。

寒武纪之后第一个一亿年的生命史是一团混乱。那个时期有许多奥秘还有待揭开。林奈的图表把生物套入一些从具体到一般的等级：种、属、科、目、纲、门、界。人们可能会设想，最初的多细胞生物大概是非常相似的，只是后来才变得多种多样起来，从最底层往上，越变越丰富，比如，先分出不同的属，然后分出不同的科，不同的目，不同的纲，如此等等。实际上，这就是最严格、最传统的达尔文主义者的期待。在达尔文的时代，地球渐变说方兴未艾，达尔文本人深受其影响。他提出，所有演变都是有用变异逐渐积累的结果。这么说，最早的多细胞生物自身应该是一种接一种逐渐分化而来的。但是，情况看来不是这样。寒武纪生命大爆炸的一个动人、迷人、让人百思不解的特色就是，林奈的图表是从上往下填写的。大自然突然间往前一跃，一下子提出了许多个天差地别的塑身方案——许多个门——然后在这些基本设计的基础上仔细琢磨，形成了一个纲，一个个目，一个个科，一个个属。

斯蒂芬·杰伊·古尔德(Stephen Jay Gould)^①写了一本关于寒武纪生命大爆炸的书，叫做《奇妙的生命：伯吉斯页岩和历史的本质》。在书中，古尔德惊奇地评述了寒武纪这种从上到下的现象。到了 2.45 亿年前的二叠纪，96% 的物种消失了。可是后来

^① 斯蒂芬·杰·古尔德(Stephen Jay Gould, 1941 - 2002)，世界著名的进化论科学家、古生物学家、科学史学家和科学散文作家，著有《自达尔文以来》、《熊猫的拇指》、《生命的壮阔：古尔德论生物大历史》等书。——译者注



又来一反弹，许多新物种演化出来，多样性从下而上地填充起林奈的图表，产生了许多新的科，几个新的目，一个新的纲，只不过没有产生一个新的门。

关于寒武纪大爆炸和二叠纪大爆炸之间的这种不对称，生物学界众说纷纭。随后的几章里提出了我个人的看法。我认为，寒武纪的生命大爆炸，就像是一项全新发明——比如自行车——中的早期技术改进。想想早期那些稀奇古怪的形式吧：大大的前轮，小小的后轮；小小的前轮，大大的后轮。各种新样式，一兴一阵风，迅速传遍欧洲，传遍美国和其他地方，一边传一边生发出大大小小的变异。一项大的改进之后，很容易发现一些大不相同的变体。再后来，改进就局限于对日趋优化的设计进行小打小闹的改进了。

我想，寒武纪的情形也是这样。那时候，多细胞生命第一次尝试存在方式的种种可能性。那些个具体的分支，就像磁带的重放，总会有些改变，可是，那分支的形式，起先是大刀阔斧、无法无天的，后来就变得谨小慎微，如切如磋，如琢如磨，越来越规规矩矩了。生物进化的深层，可能像达尔文教导我们的那样，是一个历史的过程，可同时又是遵守规律的。

我们在随后的几章里就会看到，生命之树的分支式进化跟技术的分支式进化讲述着同一个主题：复杂生物的进化和复杂技艺的进化，两者都要面对互相冲突的“设计标准”。较重的骨骼比较结实，可是，鸟飞起来就不那么灵便。较重的梁架比较结实，但同样，飞机飞起来就不那么灵便。不管是在生物还是在飞机，相互冲突的设计标准造成极其困难的“优化”难题：要你变着法儿作出最好的一系列妥协以达目的。在解决这种问题的时候，往往要先是粗粗设计出一些改进型，这时候，需要你大刀阔斧放手尝试各种千差万别的变体，这样，你的新主题会大大地受益。后来，主要改进大都试过，这时候就该小打小闹改进细节了。假如



上述的图景有些靠谱儿，那么，进化的步调就会在人类思想家创造人工制品和文化形式的演进中听到回响。

过去的 5.5 亿年里，大量的、以化石形式保存完好的生命形式粉墨登场又悄然下台。一些物种形成了，另一些物种绝灭了：形成和绝灭基本上是同来同往。实际上，新近的证据表明，就在寒武纪那一个时期里，不但物种形成的速率极高，物种灭绝的速率也极高。此后的一亿年里，物种的平均丰富性增加到某种大致稳定的状态。然而，大人小小灭绝的雪崩抹去数目或多或少的种、属、科，打乱了、至今还在不断地打乱着这一水平。许多这样的灾变也许是由或大或小的陨星造成的。实际上，白垩纪末期的物种灭绝——恐龙的全部退场恰好与这一时期相合——可能正是由于尤卡坦附近地区从天而降的大量不幸造成的。

在这本书里，我想要探索一种大不相同的可能性。用不着总由陨石或别的外来灾变来抹去整个整个的物种。看上去，物种形成和物种灭绝很可能都是生物圈内在的自发运动的反映。在生存斗争中，每个物种都要去适应共同进化中伙伴们的大大小的改变，这本身就可能驱使一些物种走向灭绝，同时也为其他物种的上场打开了缝隙。如此说来，生命是在永不停息的变化中展开的过程。有多少物种突然形成，又有多少物种突然灭绝，吐故纳新，永无休止。假如此说是对的，那么，生命形式的诞生和死亡，都是内在的过程所致，是内原的、自然的。这些横扫生境、纵跨时间的雪崩般的生生灭灭，其形式多多少少是自我组织、集体发生的现象，多多少少是复杂性原理的自然表达，这些原理正是我们所要探求的。而且，一旦我们理解了这些生生灭灭的形式，我们就必定能更加深入地理解我们全都加入其中的生命游戏，因为我们都在赶着同一个赛会。

这些创造和毁灭的大小雪崩可不是小事，因为在过去 5.5 亿年的自然生命史中，同一类现象在所有水平面上都有回响：从自



然界的生态系统到技术演进底层的经济系统，后者里面，新的货物和技术出现雪崩，迫使旧的货物和技术走向消亡。大大小小的类似雪崩甚至也出现于不断演化的文化系统。对于自然界生命史的新的理解，可能让我们对于我们的经济生活、文化生活和社会生活有新的、整合的理解，并且以这样的理解更好地支撑这些方面的生活。我将用本书的很大篇幅演绎出一些理由，能让我们认为，我们能够为那些无休止的变迁找到一个深层的理论。我疑心，生物圈里面所有复杂的、有适应性的系统，从单个的细胞到一个个经济形态，都有个共同的命运——都要演进到一个自然的状态，这个状态介乎秩序和混沌之间，是结构和意外的大妥协。在这里，在这种若危若安的状态中，共同进化、变迁的大大小小的雪崩通过系统滚雪球般增殖——这是演员们为了生存、在相互竞争、相互协作的过程中自己作出的一个个小小的最佳选择造成的。我建议，我们每个参与这个游戏的都在或大或小的范围内尽量把事情做好，可是，我们自己的最佳努力仍有可能造成某种不可预知的后果，最终把我们挤下舞台。我们当然会在太阳系找到自己的位置，在一团混沌的边缘上若危若安地存在，靠太阳辐射的能量存活一段时间，然而只不过是短暂的一时，最终还是要归于虚无。谁也说不清有多少演员来了又去，像一位很好的剧作家所说的，每一个演员都会上场，煞有介事，耀武扬威，然而也就是台上一点钟。我们的命运就是这样，是一个带点甜味的嘲讽。

我们大家都要谋生——青蛙，蕨菜，鸟儿，海上漂的海员，陆上走的绅士，都一样。从豆类植物的根与固氮菌之间的互利代谢（在这种关系中，两种生物都制造对方需要的营养），到最近在制药大王与小型生物技术公司之间结成的联合研究关系，我们大家都为每天的面包而互相买卖、交换着产品。并且，寒武纪那突然增长的丰富性（在那个过程中，每一个新物种都留下一二生存缝隙，好让其他物种前来就食，分享或从此逃生），看起来很



像一个经济体系中迅速增长的丰富性，在这种经济体系里，每一种新的货物或服务都给别的货物或服务留下一二缝隙，好让提供者借以谋生。我们都在交换自己的产品。我们都要谋生。莫不是有些普遍规律制约着所有这些行为？莫不是有些普遍规律制约着所有这些现象，从寒武纪生命形式大爆炸，到以爆炸性的革新速度把未来冲击的时间地平线拉得越来越近的后现代技术？本书就是要探讨这种可能性。

生命的法则

这么多活动，这样的复杂性，还有这些生机四溢的胆大妄为，都是从哪儿来的？假如物理学家说得对，那么，所有这些复杂性，只可以理解为自开普勒和伽利略以来开始让教会不安的那些基本法则作用的结果。对科学的所有期许中这一最深邃的期许，这种对于基本规律的探求，值得我们给予最深的敬意：它是科学中还原论的理想所在。用斯蒂芬·温伯格(Steven Weinberg)新著的题目说，这便是那个“终极理论之梦”。温伯格对那个古老追求的总结是发自内心的。我们总是在寻求还原论的解释。经济的、社会的现象，要用人类行为的理论加以解释。人类行为呢，又进而用生物学过程的理论加以解释，后者又要用化学的过程来加以解释，而化学的过程，又要由物理学的理论来加以解释。

关于还原论工程的效用，论者已经说了不少。但是，我们大家至少能在下述几点上达成共识：假如我们应该寻找那个终极理论——也许是一个超级串，植根于一个十维空间中，其中有6个维蜷曲在自身之内，剩下的4个伸向某种量子化时空的拓扑学泡沫塑胶，将重力和其他三种作用力纳入一个概念框架——假如我们最终找到了那个终极理论，那将不是事情的结束。那将是万里



长征第一步。因为，在那个真正伟大辉煌的日子，当那个基本定律永久地铭刻在某种卡拉拉大理石石碑上，或者像物理学家里昂·莱德曼(Leon Lederman)提议的，印在一种T恤的前胸上的时候，我们就真的不得不开始计算那个定律所能造成的后果了。

我们还有指望完成这个还原工程的后一半吗？我们能运用那些法则去理解我们所看到的生物圈吗？这里，我们面临一个关于解释和预言的分界问题。潮汐表可以预言，但不能解释。牛顿的理论既能预言，又能解释。许多生物学家认为，达尔文的理论能解释，但临到预言就虚弱无力。我们的终极理论可能很好地解释，但几乎一定不能预言细节。我们有两个理由能预言它不能预言：一是量子力学的理由。量子力学决定了在原子水平以下根本没有确定性。由于那个不确定性有着宏观的后果——比如，一个随机的量子事件可以引起DNA分子的突变——这似乎从根本上禁止我们在关于一切分子和超分子事件作出预言时忽略细节。第二个困难来自一个现称混沌理论的数学领域。混沌理论的中心思想很简单，用一个所谓的“蝴蝶效应”可以很好地加以说明：一个假想的蝴蝶在里约扇动翅膀，就会改变芝加哥的天气（我在芝加哥住过。我私下认为，没有什么东西能改变那儿的天气）。每当有人援引这个例子，似乎总是讲这只蝴蝶。如果人们来一个脑筋急转弯，就可能不难想象出另外的例子，比如奥马哈的一只蛾子，或者希博伊根的一只燕八哥。不管肇事者是什么有翅会飞的动物，要害都在于，混沌系统中任何小小的改变，都可能、一般来说也当真有着巨大的和越放越大的效应。于是，这一敏感性就意味着，关于初始条件的细节——不管那只燕八哥的翅膀扇动得多快，以什么角度扇动，具体怎么扇动——你得知道得无限精确，才能预言有什么结果。可是，不管从实际操作上考虑，还是从量子论上考虑，这种可能性都会被排除。于是得出大家熟悉的结论：关于混沌系统，我们不能预言其长期的行为。然后还请注意



意，不能预言，并不意味着不能理解、不能解释。实际上，假如我们确信自己知道制约一个混沌系统的那些方程式，我们就确信自己理解它的行为，包括理解自己何以不能从细节上预言其长期行为。

假如我们将要一般地和从原则上经常被杜绝用那个终极理论作出细节性的预言，那么，我们还能指望什么呢？我曾经带着相当的兴趣倾听过一个室内装修专家的高见，知道他的设计感觉确实比我的感觉好。我跟他学到了一句颇为管用的口头禅：就是那么种东西。呵，这句口头禅真个是放之四海而皆准呵，你看，即使在我们不能够预言细节的时候，我们还是可以有种种的希望预言某种东西。这里的希望是，你总还可以预言一些系统分属哪类，有何种特征，当下何妨大而化之，反正日后总会更加确切，反正也不过是贴贴标签，分分类属，用不着提供什么细节。举例来说，水结了冰，人们并不知道每一个水分子在什么地方，可是关于你的典型的冰块，你仍可以说出很多——它具有怎样特定的温度，特定的色泽，还有特定的硬度：总之是些皮毛的、类属的特征，用不着了解多少关于其结构的细节就能开口讲话。关于像生物和经济形态这样的复杂系统，你亦可照此办理。我们也可以在对其细节一无所知的时候，就构建一些理论去解释它们的类属性质。

理论科学的进展常常基于对一个有意思的现象给出有用而简洁的描述。这一损之又损的描述捕捉到的并不是那一现象的所有特点，而仅仅是根本的、相干的那些特点。一个简单的例子就是那种老爷钟的钟摆，说得堂皇一点，是一个谐振器。你可以描述这个钟摆的构成，长度，重量，颜色，它表面上雕刻的花纹，它跟相邻物件的距离，等等，等等。可是，要理解它周期运动的基本性质，只有它的长度和质量是重要的，别的并不重要。关于我们是如何简洁描述一个复杂系统的，统计力学提供了最清楚不过



的例证，那就是运用统计平均得出的，因而是典型的和类属的性质。单位体积气体在热平衡时的平均性质是它的温度和压力；两者对单个气体分子的行为细节照例是不理会的。

统计力学证明，关于复杂系统我们可以构建一些理论，这些理论不理睬细节。但是，关于气体的统计力学相对地简单些，因为所有气体分子都遵从牛顿关于运动的同一些定律，于是我们就可以去探究气体分子的平均的、集体的运动。众人所熟悉的统计力学都是关于简单的无规则系统的。生物体可不是简单的无规则系统，而是高度复杂的、异质的系统，而且经过 40 亿年的进化到了今天。想要建立关于生物学秩序的深层理论的愿望，其中心就是要发现活生生的复杂系统有哪些关键的生物学性质，这些性质可以不依赖所有细节而存在。假如生命系统的所有性质都有赖于关于它们的结构和逻辑的每一个细节，假如生物体是些任性的小机器，装配在任性的洋玩意儿里面，这些洋玩意儿又属于更大的任性装置，如此等等，那么，要理解生物圈的奥妙，我们面临的认识论问题将是巨大的。可是，假如不这样，假如最深刻、最重要的中心现象不依赖所有的细节，那么，我们就有希望找到一些美丽而深刻的理论。例如，个体发生学，那门关于一个受精卵如何发育成为一个成体的学问，制约它的要件，只是—些基因网络及其在体内每一细胞里的产品。假如这一展开过程有赖于那个网络的所有微小细节，那么，要理解生物体的秩序，就需要知道所有那些细节。但事情并非如此。在随后几章里，我将给出强有力的理由来认为，我们在发育中看到的许多秩序，它们的出现，几乎不理睬那些相互作用的基因网络是如何串连到一起的。这种秩序强健有力、自然发生，是某种自发结构的集体成形。这就是那种秩序，其来源与性质我们可望不依赖细节而理解。这就是后来自然选择加以进一步锻造的那种自发秩序。

探索这些性质正在成为一个基本的研究战略，我在本书中将



要大量地运用这一战略。既然如此，研究者就希望理解、解释、甚至预言这些自发产生的性质的出现；然而，他也就放弃了对于预言细节的梦想。我们将要探讨的案例包括：生命是不是起源于由一些化学成分组成的复杂系统集体产生的性质；受精卵发育成为成体，是不是作为相互控制彼此活动的复杂基因网络的自发性性质；还有产生出大大小小的绝灭与创生之雪崩的生态系统中共同演化的不同物种的行为。在所有这些案例中，所出现的秩序依赖于那些系统的粗的、类的性质，而无关乎细节的结构和作用。在林林总总千差万别的条件下，秩序除了表达自己，几乎别无他途。

但是，这些自发秩序的法则，假如有朝一日被我们发现，如何能跟达尔文的随机突变和机会主义的选择达成妥协呢？生命怎么能偶然发生，不可预测，像是事故，同时又遵从一些一般规律呢？我们在思考历史的时候，也会发生同样的问题。能否发现一般规律，历史学家言人人殊；有些历史学家干脆回避发现一般规律的任何希望。我本人当然不是历史学家，但还是想提出一些建议。因为现在已经有望看到，从最一般的水平观之，凡是活的系统——细胞，生物体，经济形态，社会——都会现出一些似乎是规律性的性质，只不过装饰了太多花里胡哨的花边，就是那些奇妙的历史细节，总让人想入非非，设想事情可能很容易变为另外一个样子的，它们的不可能性让我们不由得一个劲儿地敬畏和赞叹，那些规律性因此就湮没不彰罢了。

于是，我们又回到了那个穹隆一样涵盖一切的问题：这么多活动，这样的复杂性，还有这些生机四溢的胆大妄为，都是从哪儿来的？我们就是想理解像我们周围这团有序的复杂性是如何产生的，从哪儿冒出来我们所见的这些生命形态，它们所构成的生态环境，那些到处都是的社会系统，从昆虫的社会到灵长类的社会，还有实际上供应着我们每日的面包、让亚当·斯密



(Adam Smith)^①惊奇不置、因而大起“看不见的大手”之念的那些各种各样经济形态的奇观。我是个医生兼生物学家。我怀着足够的希望认为，我或许能有助于理解生命的起源及其随后的演化。我不是物理学家，不足以恬不知耻地自诩能够思索宇宙的演化。但是，我还是纳闷儿：这么多活动，这样的复杂性，还有这么多生机四溢的胆大妄为，都是哪儿来的？说到底，那必定是一个不平衡的宇宙的某种自然表达方式。那宇宙并不是一试管毫无特色的同质的气体分子。那儿有差别，有潜力，这差别、这潜力，驱动着复杂性的形成。150 亿年前大爆炸的震响生出了一个宇宙，据说它至今仍在膨胀，或许永远不会在大坍缩中再凑到一块儿。那是一个不平衡的宇宙，充满了太多的氢原子和氦原子，比起那些最稳定的原子形式——铁——来多得多。那个宇宙有很多星系，很多不同规模的星系集团，那里本来是一片虚无，似乎什么东西都不能产生。那个宇宙里有丰富到令人惊讶的免费能量可用来做功。在某种意义上，我们身边的生命是那些免费能量跟物质形态的耦合。怎样耦合的？没人知道。但我们可以一路下去想出一些假说。这儿就不纯是科学的探索了。毋宁说是一种神秘的向往，是过去 300 万年里某个时候、在某一小堆篝火四围开始寻找的一个神圣的核心。我们就是这样寻自己的根的。假如我们终究是一些不平衡系统中以我们尚未理解的方式耦合的物质和能量的自然表达，假如如此繁茂的生命是注定要出现的，不是不可思议、不可能发生的事故，而是经过那个自然秩序十月怀胎、足月分娩、天经地义要来的，那么，这个宇宙就真的是我们的家园了。

物理学家、化学家和生物学家熟悉产生秩序的两种主要形

① 亚当·斯密 (Adam Smith)：著名的经济学家，他奠定了自由市场经济学的基础，其经济学理论对现代西方国家经济有着深远的影响，其著作《国富论》被视为经济学界的经典，西方国家市场理论基本是以其经济模式建立起来的。——译者注



式。第一种形式跟一个被称作低能量平衡系统的东西有关。一个熟悉的例子是，把一个小球放在碗里，球就滚落到碗底，来回滚一会儿，然后停住。球停的位置把自身的势能减到最小。它的动能本是来自引力的，现已在摩擦中变成热量散发掉。球一旦达到平衡，到了碗底的位置，就不再需要进一步施加作用力来维持这一空间秩序。在生物学里，也有一些类似的例子。病毒是一些DNA和RNA分子串组成的复杂分子系统，这些分子串拧成一股绳子，在绳子的周围，聚集起一些蛋白质分子，形成尾毛和头状结构，还有其他一些特征。在合适的水环境里，分子状态的DNA、RNA以及蛋白质组成元素里的病毒粒子会自我集结，像碗里的那个小球一样寻找自己的最低能量状态。病毒一旦形成，就不再需要输入能量来维持它的存在。

产生秩序的第二个途径，是需要源源不断地输入质量或能量，或输入两者，来维持那个有序的结构。跟碗里的小球不一样的是，这里的系统是不平衡的系统。澡盆里的涡流就是一个熟悉的例子。涡流形成后，假如有水源源不断地加进澡盆，而排水孔敞着没关，那个不平衡的旋流就能在较长时间内保持稳定。最令人惊异的一个持续不平衡结构的例子是木星上的大红斑，看上去，那个大红斑是那个巨大行星大气上层中的一个涡流。那个大红斑涡流本质上是一个风暴系统，已经存在了数百年了。于是，大红斑的寿命比任何一单个气体分子与它有牵连的平均时间都要长得多。那是一个物质和能量的稳定组织，通过这个组织，物质和能量两者都在流动。这很像一个人体：人体的分子成分在人的一生中要改换许多次。这样一比是很有意思的。这里可以进行一次相当复杂的讨论：木星大红斑是不是活着，假如不是，为什么。大红斑毕竟在某种意义上坚持了下来，适应了它的环境，似乎还生出了一些小小的子涡流呢。

像大红斑这样的不平衡有序系统，是靠消耗物质和能量来维



持的，因此被诺贝尔奖得主伊利亚·普里高津(Ilya Prigogine)称为耗散结构。那是好几十年前的事了，从那时起，这样的系统得到了巨大的关注。大家对之如此感兴趣，部分是因为这些结构跟热力学系统构成对照，在热力学系统中，跟平衡相关联的是向着几率最小、最无序的状态崩塌的过程。耗散系统则不然，在这里，物质和能量通过系统的流动，乃是产生秩序的驱动力。大家对耗散结构如此感兴趣，还有一个原因：大家意识到，凡是自由生存的系统都是耗散结构，都是些复杂的、进行着代谢的涡漩。在这里，我要小心地把自由生存的系统跟病毒区分开来。病毒不是自由生存的实体；毋宁说，它们是些寄生物，必须侵入细胞内才能繁殖。而已知的自由生存系统则都是由细胞组成的，从细菌到蝇，莫不如此。细胞并不是低能量结构。一路嗡嗡叫着的细胞，乃是一些复杂的化学系统，其内部结构和繁殖，是靠不停地代谢着食物分子来维持的。因此，细胞是不平衡的耗散结构。有趣的是，有些简单的细胞，如孢子型的细胞，原先被认为就是低能量结构的，因为它们可以进入休眠状态，而对于大多数细胞而言，平衡却等于死亡。

由于一切自由生存的系统都是不平衡的系统——实际上，生物圈本身也是一个由太阳辐射之流驱动的不平衡系统——假如能建立一些普遍法则来预言所有不平衡系统的行为，那岂不是有着最深刻的意义吗？然而遗憾的是，试图寻找这种普遍法则的努力迄今还没有取得成功。有人认为，这些法则永远不会被发现。之所以没有成功，并不是因为我们不够聪明，而是一个颇有根基的数学领域造成的结果，那个领域叫做计算理论。那个漂亮理论论及一个叫做可有效计算的规则系统。规则系统就是一组解题程序，比如二次方程的求解程序，我们学数学的时候都被教过。岂止被教过，为了让我们死记住它们以使用来解二次方程，老师还要我们全班把那些规则画到肚子上呢。长话短说吧，任何人，哪



怕是木头人，只要细心，都能执行那些规则系统。计算机就是这样的木头人，而常用的计算机程序都不过是一些规则系统。

计算理论是有足够的深刻定理支撑着的。那些最漂亮的定理显示，要预言一套规则能做出什么事来，最好干脆去执行这些定理，观察所发生的一系列行动和状态如何展开，舍此更无捷径可走。那套规则自身就是关于它的最简捷的描述。用那一领域的行话说，它是不可化约的。

要论证并不存在什么普遍规律能够预言所有不平衡系统的行为细节，还有很简单的一步。真实的计算机，那些由现实材料制作、有电源插到墙上插孔里的，阿兰·图灵(Alan Turing)称之为通用计算系统。图灵证明，如有无限长的存储带，一台通用计算机可以执行任何规则。于是，一台实在的计算机便具有一个不平衡系统的品质；只要源源不断地供给能量，它就能利用这能量去以种种方式操纵一些硅片里的电子数位，从而进行各种运算。可是，计算理论告诉我们，这样的装置有可能以其自身最简捷描述的方式而行动。要预言这种真实的、实在的系统能做出什么事来，最简捷的方式只是看它运行。但是，理论的目的，不就是要提供一个更简洁、更化约的描述吗？不就是要开普勒的那些定律，而不是关于什么时候什么行星处于什么位置的一览表吗？既然这样一个物理的计算机是一个实在的不平衡系统，既然我们不能够预言它的行为细节，那么，我们就不可能有一个一般理论来预言所有可能的不平衡系统会有哪些行为细节。然而细胞，生态系统，还有各种各样的经济系统，也是一些实在的不平衡系统。可以想见，这些系统也是一样，也会以其自身最简捷描述的方式而行动。

在思考存不存在生命规则的时候，许多生物学家会坚定地回答说，没有。达尔文已经教给了我们血统修饰说。现代生物学认为自己在深层意义上是关于历史的科学。生物体所共有的特征



——大名鼎鼎的遗传密码，脊椎动物的脊柱——不被看作是深层法则的表达，而被看作是随机出现的有用事件、代代相传而成的有用小玩意儿，一旦形成就存在、定型于某一世系的某一支派。实在看不出生物学在血统修饰说之外，还能产生出什么更高明的法则。可是我相信，这样的法则是能够找到的。

我们都希望理解我们周围的生态系统的秩序，而且，我们也看到了，这个秩序可能既是低能量平衡形态（碗里的小球，病毒）的反映，又是不平衡耗散结构（由物质和能量的交换维持的活涡漩）的反映。然而，在这种理解的路上，我们现在遭遇到至少三个难题。第一个，量子论不允许对分子水平的现象做出细节性预言。不管那一最终理论是什么，难道，为预言世界的细节状况，人们抛掷的量子骰子还不够多吗？第二个困难是，就算经典的决定论真是对的，混沌理论也还是告诉我们，初始条件的极小改变，都可能导致一个混沌系统在行为上发生深刻的改变。从现实上讲，我们对初始条件的了解无法准确到足以预言行为细节的程度。最后，计算理论似乎意味着，不平衡系统可被看作是正在执行规则系统的计算机。规则系统如此之多，关于它们的行为人们无法获得简约的、有规律性的描述。

如果生命的起源和进化像一个不可化约的计算机规则系统，那么，原则上我们便不能有简约的理论来预言那个系统展开以后的所有细节。那样一场盛大的露天表演，我们必须站开点，从远处观看。我疑心，我的这个直觉没准儿会证明是对的。我疑心，从深层意义上讲，进化本身就像是一套不可化约的规则体系。如果我们想要了解它的细节，我们就得满心惊奇、满怀敬畏地观看、计数、再计数那恒河沙数的生命支流，还有它那恒河沙数的分子细节和形态发生学细节。

话又说回来，即使进化真的是这样一个不可化约的过程，也还是不能说，关于那个不可预测的洪流，我们就无法找到一些制



约它的深刻而美丽的法则。因为，还没有什么东西排除这样的可能：从深层上讲，生物体的许多特征及其进化是粗放的、不理睬细节的。我相信，假如存在许多这样的粗放性质，那么，就会有一些深刻而美丽的法则制约着生命的出现和生物圈的种群数量。说到底，我们在这里追求的，并不一定是细节的确切性，而是解释。我们永远不能指望确切地预言生命之树怎样分枝生权，但却有可能揭示一些强有力的法则，可用以预言并解释这些枝枝杈杈的一般形状。我于这样的法则有厚望焉。我甚至还敢于希望，我们现在就可以开始勾画其中的部分。一时还找不到更好的笼而统之的词语来描述这样的努力，只好暂且名之为“自然发生理论探索”了。

免费的秩序

生物学的巨大奥秘在于，生命竟然出现了，在于我们所看到的秩序竟然来了并能通行。有必要做成一个关于自然发生的理论，用以解释我们窗外令人惊绝的秩序：那一切必定是某些深层法则的自然表达。那个理论会告诉我们，宇宙是不是我们的天经地义的家园；我们是不是足月分娩、注定要来的，而不是在灭顶的背运中不知怎么竟然存在的。

有些词语引人遐想甚至令人恼怒。自然发生一词就是这样。通常，我们用这样一句话来表达这个概念：整体大于部分之和。这个句子让人恼怒：难道，整体里面还能有什么东西是部分里面没有的？我相信，生命本身就是一个自发产生的现象，可是，我这样说的时候并无丝毫神秘感。在第二章和第三章里，我将要花大力气找出一些理由让你相信，足够复杂的化学混合就是能自发地成为系统，这些系统能够集体动作，催化化学反应之网，通过这些反应，分子就会自发形成。这种集体的自催化系统会支持自



己，并且复制繁衍。这差不多就是我们所说的活的代谢系统了。正是各种各样相互纠结的化学反应，为我们身上的每一个细胞提供着能量。如是观之，生命乃是自发的现象，是在前生物化学系统的分子多样性增加到越过某个复杂性阈值的时候发生的。假如这是对的，那么，生命就不在任何单个分子的性质之中——就是说不在于细节之中——而是在相互作用的各种各样分子组成的系统的集体性质之中。如是观之，生命乃是自发产生的整体，并且一旦产生就坚持不懈地保持整体。如是观之，生命就不在它的部分之中，而在它们所创造的整体所具有的集体自发性质中。尽管生命作为一种自发的现象可能有深刻的含义，但其本质的整体性和自发性毫无神秘之处。一组分子，要么能够催化自身形成，从某些简单的食物分子复制繁衍，要么就不能。在自发产生、自我复制的整体中，并没有什么生命力或者外来物质存在。但是，那个集体的系统却有着一种令人惊讶的性质，是它的任何部分所不具有的。它能够复制自身并且演化。那个集体的系统是活的。它的部分则无非是些化学物质。

生物学秩序的最令人敬畏的方面在个体发生学。就是那发育成生物成体的过程。在人类，这一过程始于一单个细胞，就是那个受精卵，或曰合子。合子经历大约 50 次细胞分裂，产生出大约 10^{15} 那么多细胞，形成一个新生儿。与此同时，那个合子的一单个细胞类型，分化出成体所拥有的大约 260 个细胞类型——肝细胞、神经细胞，血红细胞，肌细胞，等等，等等。控制发育的那些遗传指令存在于每一个细胞核的 DNA 里面。这一遗传系统大约包含着 10 万个不同的基因，每一个基因都含有合成一种不同的蛋白质所需的密码。值得称道的是，所有类型的细胞的基因组几乎都是完全相同的。细胞个个不同，是因为不同的次基因组在起作用，造成各种各样的酶和其他蛋白质。血红细胞有血红蛋白，肌细胞含有大量的组成肌肉纤维的肌纤朊和肌浆球蛋



白，等等，等等。个体发生学的奥秘在于，基因、它们的 RNA 和蛋白产物构成一个复杂的系统，以准确得令人惊叹的方式彼此打开、关闭。

我们可以把这一由染色体组构成的系统看作是一个复杂的化学计算机，不过，这个计算机不同于我们所熟知的顺序处理式计算机：那种计算机一次只执行一个行动。而在染色体组系统中，有许多个基因及其产品同时在活动着。所以，这个系统是某种并行处理式化学计算机。发育中的胚胎及其发育轨迹有着不同的细胞类型，在某种意义上，这些不同类型的胚胎及其发育轨迹乃是这个复杂的染色体组网络的行为的表达。现存任何生物体内的每一细胞内都有这样的网络；这些网络至少是 10 亿年进化的结果。大多数生物学家，就是那些达尔文的传人们，假定个体发生学中的秩序是某种分子水平的鲁布·哥德堡式复杂而易错的机器慢慢消磨出来的，而那机器则是由进化过程一片一片漫不经心扔到一块儿凑成的。我在这里提出一个与之反对的假说：见之于个体发生学中的那个美丽的秩序是自发产生的，是那个令人惊叹的自组织规律的自然表达，那个自组织的过程充斥于非常复杂的协调网络中。我们可能在极其深刻的意义上弄错了。秩序，那个巨大而又有着生发能力的秩序，是自然发生的。

见之于染色体组网络中的那个自发产生的秩序，预告着进化论中的一个概念斗争，甚至可能是一场概念革命。我在本书中提出，生物体中的大部分秩序可能根本不是自然选择的结果，而是自组织系统中自发产生的。秩序，那个巨大而又有着生发能力的秩序，不是在与熵增之潮抗争中产生的；而是一分钱不用花，俯拾即是，从底层支撑着随之而来的所有生物学进化。生物体的秩序是自然的，不是自然选择不期然的胜利。举例来说，我随后就要给出强有力的理由来认为，细胞通过自我平衡而取得的稳定（使一个肝细胞不致变成一个别的什么细胞，比如肌细胞的那种



生物学惯性)，一个生物体内细胞类型的数量与它的基因数量的关系，还有生物体其他的特征，不是达尔文式选择的随机结果，而是那个免费秩序的组成部分，那个秩序则是由染色体组的诸多协调网络中的自组织提供的。假如真是这样，那么，我们就必须重新考虑进化理论，因为，既然如此，要谈生物圈内秩序的来源，就要把选择和自组织两者都包括进来。

这个课题庞大而又艰难。我们刚刚开始拥抱它。从这个观点看生命，生物体就不像是敲敲打打拼凑起来的洋玩意儿——用雅各布的话说，是一种 bricolage（业余修理工作）。进化不像是莫诺说的那样是“撞大运”。生命在历史中自然地生出了秩序，选择则有权对之采取行动。如果此说是对的，那么，生物体的许多特征就不仅仅是历史事故，而同样是那个深层秩序的反映，那个秩序本身亦是通过进化塑造的。如果真是这样，那么，宇宙就真的是我们的家园，这种宇宙为家的理念，是自从达尔文把他那瞎眼的钟表匠奉为自然神之后的人们所不敢梦见的。

然而，自组织昭示的还不止这些。我讲过，我们必须把自组织和达尔文式选择两者的作用都包括到进化论之内。但是，有序的这两个来源会以复杂的方式合并在一起，复杂到我们几乎就无从理解。无论是物理学，化学，还是生物学，或者是其他别的什么理论，都还没有拉成这桩皮条。我们只得重新思考。在自组织和选择相配而生的子孙中，没准儿就会有新的普遍规律在。

我们甚至有可能现在就着手勾画一些制约着这一婚议的可能存在的普遍规律。这样做大约会令人吃惊，也可能是大有希望而且美妙无穷的。因为，既然那么一大些分子挨挨挤挤凑成自我复制繁衍的代谢系统，细胞跟细胞协调彼此的行为形成了多细胞的生物体、生态系统、甚至是种种经济和政治的形态，那么，这里面难道没有任何共同之处吗？有一个奇妙的可能性，它尽管大胆然而脆弱，仍可以做成一个假说，这就是：在许多条阵线上，生



命都在朝着一个王国推进，那个王国若危若安地存在于秩序和混沌之间。有一个耐人寻味的说法让人想到这个假说：生命存在于混沌的边缘。借一个物理学的术语来打比方，生命大约存在于某种相态跃迁的不远处。水以三种相态存在：固态的冰，液态的水，还有气态的蒸气。现在似乎渐渐看出点眉目来了：类似的想法大约也可推及复杂的适应性系统。比如，我们将会看到，控制着合子向成体发育的那些染色体组网络，可能以三个主要相态存在：成形的有序相，气态的混沌相，还有某种介乎有序和混沌之间的液态相。这是一个可爱的假说，有相当的数据支持它。这个假说可以表述为：染色体组系统大致以有序的成形状态存在，但靠近向混沌状态跃迁的边缘。假如这些系统过深地处于成形有序相态，它们就会过于僵硬，无法协调发育所必需的遗传活动的复杂程序。假如它们向气态的混沌相走得太远，它们就将不够有条理。这一处于混沌边缘的网络系统，这一秩序和惊奇的妥协，似乎最有能力协调复杂的活动，也最有能力进化。这是一个非常迷人的假说：自然选择成就了有遗传调节能力的网络，这个网络存在于混沌的边缘上。本书的大部分篇幅就是要致力于探讨这一主题。

进化是一个关于生物体如何通过遗传变异而修正自身、以求改善自己的适应性的故事。长期以来，生物学家一直心怀着一些适应性地形，在那些地形里，高高的山峰代表高度的适应，林林总总的生物种群在突变和自然选择的驱动下游移或随机漂移，在地形画面上寻找着高峰，但可能永远也达不到那儿。适应性高峰这一概念在许多水平上都可用。比如，它可以代表一个蛋白质分子催化某种特定的化学反应的能力。在那样的情况下，高峰就对应于一些对这种化学反应最具催化作用的酶，它们比处于山脚的那些蛋白质做得都好，而处于山谷里的那些做得就最差。适应性高峰还可以代表整个生物体的适应性。在这种更为复杂的情况



下，具有某一组特定特征的生物体，一般说来，如果更有可能留下后代，其适应性就较好，在地形里就处于较高的位置。

在本书中我们将会看到，不管我们讲的是生物体还是经济形态，都有一些普遍得令人惊讶的法则在制约着群峰耸立的适应性地形所标示的适应过程。这些普遍法则可能解释一些现象：从寒武纪的生物进化大爆炸——那时候，生物门类从上而下地填充起林奈的表格——到技术的演进——在那一领域，早期是天马行空大胆落笔，千差万别的变体异彩纷呈，后来又是小心收拾，细细改进。混沌边缘这个概念也是一个颇有潜力的普遍法则。在攀爬适应性峰巅的过程中，林林总总的生物种群都在做着适应性改变；那些谨小慎微、按部就班、循道而进的种群很可能滞留在山脚，自认为能事尽矣，只能到这儿啦；可是，过于活跃、满山找近道的那些种群同样会失败。在进化的空间中，最好的探险是在一种介乎有序无序之间的转型性态相中发生的。在那种状态中，生物种群隐入近处那些自己凝视已久的小山，顺着山梁，向远方适应性更高的区域流动。

这幅混沌边缘地形图也在共同进化中呈现出来，因为，随着我们的进化，我们的对手也在进化；要保持适应，我们必须以变应变，对它们的适应性改变回应以适应性改变。在共同进化的系统中，每一个合作伙伴都在适应性地形中向着高峰攀爬，甚至在这幅地形图由于共同进化的伙伴们的适应性行动而时时变形的情况下也是这样。令人惊异的是，这种共同进化的系统同样以三种态相而行动：一种有序相，一种混沌相，还有一种转型相。这真有点像鬼似的让人捉摸不定：这种共同演化系统似乎也在向着混沌边缘王国演化。好像有只看不见的大手在拨弄着一样，每一个变化着的物种都根据自己的私利而行动，然而，整个系统却神奇地向一种若危若安的状态演进，在那种状态中，一般来讲，每一个物种还都尽力作为，以孚众望。尽管如此，像本书中我们将要



研究的许多动态系统一样，每一物种最终都不免被驱于消亡，尽管它自己已尽力而为，但还是挡不住作为整体的那个系统的集体行动。

我们将会看到，技术演进可能由一些法则制约着，这些法则与那些制约前生物化学演进和适应性共同演化的法则相类。生命起源于化学丰富性门槛，个中逻辑，跟经济腾飞来源于货物和服务丰富性门槛的理论如出一辙。一旦越过这个门槛，就要产生出新的物种，新的分子，新的货物和服务，而它们又为更新的品类留出空隙，那些新的品类将要在爆炸般的可能性中被唤醒生命。像一切共同进化的系统一样，经济系统把多少是缺乏远见的商家的自私活动联系在一起。生物进化和技术演化中的那种适应性步骤驱动着分化和绝灭的雪崩。而不论是新种分化还是旧种灭绝，那个系统都会自我调节到混沌边缘那若危若安的状态，在那里，所有的玩家都尽其可能地把小日子过好，又会终究退下舞台。

混沌边缘说甚至可以让我们对民主制度的机理有个新的、深刻的理解。我们已经把民主制奉为世俗的宗教；我们争论它的道德基础和理性基础，并以之为安身立命之所。我们希望自己的民主传统将把它充满的自由溢出国界，沾润全球。在随后的几章里，我们将会看到一些令人惊奇的新的理由，说明民主制那世俗的智慧有能力解决艰难的问题，那些问题的特点是由相互冲突的利益构成的错综复杂的蛛网。人们组织成一些群体，每个群体都为自己的利益而行动，运用各种手段在相互冲突的利益中谋求妥协。这个看起来杂乱无章的过程中同样能看出一个有序王国，在那儿，蹩脚的妥协很快就能找到；那又是一个混乱的王国，在那儿，永远达不成一劳永逸的妥协；那是一个转型中的态相，在那儿，妥协终能达成，但不会一蹴而就。最好的妥协似乎出现于有序无序之间的态相转变之中。所



以，我们总能看到一些为多元化社会辩解的苗头，说那是一种便利适应性妥协的自然设计。民主制无疑是一个进化中的复杂社会解决复杂问题的最佳程序，循此程序，可能最便于达到共同进化地形中的高峰，在那里，众生都有可能滋长繁荣。

要智慧，不要力量

我在随后的几章里提出，生命的形成，可能是一个物理和化学的自然结果；生物圈里的分子多样性可能是在有序和无序边界区域迅速萌生的；个体发生中的秩序可能是自然产生的；沌边缘说的普遍法则，可能制约着由物种、技术、甚至是意识态组成的共同体，制约它们一同演进。

这个混沌边缘乃是个绝妙的所在。它是一些物理学家新近作出的一个绝妙发现的近亲。那些物理学家是佩尔·巴克（Per Bak）、唐超（Chao Tang 的译音）和科特·韦森费尔德（Kurt Wiesenfeld），他们把自己发现的新理论称为自组织临界状态。那个理论的核心，可以由一个例子来比拟。设桌面上有一小堆沙，而且还在缓慢匀速地往上添加沙子。最终，沙堆越来越高，崩塌开始了。人们会看到许多小的崩塌和为数不多的大的崩塌。假如把崩塌的规模画到大家熟悉的笛卡坐标系的 x 轴上，而把该规模的崩塌的数量画到 y 轴上，由此得到一条曲线，代表着一个称为幂律的关系。在随后的几章里我们将回到这个特定的曲线，不过这里先提一句：这条曲线有一个令人绝倒的含义：同样大小的沙粒所引发的崩塌可大可小。尽管我们可以说，小的崩塌有很多，而大的崩塌则很少（这是幂律分布的本性），但是，没有可能预言哪一粒沙子会无足轻重，而哪一粒沙子又会是灾难性的。

沙堆，自组织临界状态，混沌边缘。如果我是对的，那么，共同进化的本质，就是要达到这个混沌边缘，一个妥协之网，在



那里，每一个物种都尽可能兴盛地生活，但没有一个物种能够有把握预知，它的下一步最佳行动将会引发一道涓涓细流呢，还是引发一场雪崩。在这个不安定的世界里，大大小小的崩塌，每时每刻都在无情地扫过整个系统。每一个活物、每走一步，都会引发或大或小的崩塌，这些崩塌也许会吞没下方山坡上别的登山者，也许会与它们擦肩而过。玩家可能会被自己的脚步所引发的崩塌冲走。这一地形或许捕捉到了我们所探求的自发产生理论的本质特征。在这一介乎有序无序之间的若危若安的状态中，玩家不能预言他们行动的结果展开后会是什么样子。一方面，这一若危若安状态中崩塌规模的分布自有规律可循，而另一方面，每一个个案中都存在不可预测性。如果一个人永远不能知道自己的下一步行动会不会引发下个世纪的雪崩，那他最好每迈出一歩都要非常小心。

在这么一个若危若安的世界中，我们必须放弃那种自命不凡的远期预测。我们无法知道自己最佳行动的真正后果。我们所有玩家所能做的，只是把自己门前的事儿明智地办好，而不要去管全球的事。我们所能做的，我们所有活物所能做的，只是扯起裤腿儿，穿上套鞋，走好自己的路。只有上帝才理解那最后的法则，才知道那量子的骰子会转出几点。只有上帝能预言未来。我们不能。尽管经过了 34.5 亿年的设计，我们还是些近视眼儿。我们，加上所有其他玩家，都不能够预言那些雪崩和由我们共同生发的那些错节盘根。我们只能在自己门前、在自己的水平上尽量地把事办好。就靠这个也过得下去。

自培根(Bacon)以来，西方的传统一直认为，知识就是力量。但是，既然我们在空间和时间中的活动范围扩大了，我们就不得不力求对我们理解的局限性进行理解，甚至理解我们潜在的理解。假如我们能发现一些普遍规律，假如那些规律规定，生物圈和其中的一切要共同进化到那个沙堆的状态，若危若安地处于



混沌的边缘，最明智的办法就是明智。我们进入了新的千年。在进入的时候，我们最好对太阳里那些永远变化和不可预测的所在满怀温情的敬意。宇宙是我们所有活物的家园，踌躇满志地要恩准我们最好的、短暂的、只有一次的逗留。



第二章 生命的起源

不论谁告诉你，她或他知道约 34.5 亿年前生命如何起源于那个死沉沉的地球，那不是个傻瓜，就是个无赖。没有人知道。实际上，我们也许永远也无法重建 300 万个千年以前是怎样的一些分子事件导致了最初那些自我复制的、会演化的分子系统；我们也许永远也无法重建那些分子事件的确切的历史轨迹。但是，就算那一历史轨迹永远湮没不彰，我们仍能发展一些理论和实验，来演示生命可能是以怎样的现实方式成形、扎根，尔后盖满了整个地球的。但记住那个警告：没有人知道。

神明一语，黑暗与光明划然而开。第三日，生命形式造了出来：有鱼，有鸟，还有更多。亚当和夏娃于第六日醒来。这个神话，就是认为生命如此迅速地起源，毕竟没有大错。实际上，从一团熔岩之球到生命萌生，其间几乎间不容发。当那个气团内敛、形成原初地球的速率显著减缓、地球表面冷却到足以支持液态水的时候，地球就成了生命诞生的母体了。地球老矣，它大约已经 40 亿岁。没人知道最初那些自我复制的分子系统是什么样子。可是，到了大约 34.5 亿年前，一些古老形式的细胞就开始化成泥土或石头，被埋葬起来，为我们日后解答问题留下了蛛丝马迹。我不是研究这些古老化石的专家，然而却乐于在第一章里分享了威廉·肖夫和他在全球各地的同行们漂亮的研究成果。图



1.1 和图 1.2 显示的就是最早的细胞的化石。

这些早期细胞表现了多么惊人的进步！从它们的形态发生，人们可以猜测，像当今的细胞一样，它们的膜是一个双脂层——就是某种由两层油脂分子做的肥皂泡——包裹着一个分子系统，那个系统有能力维持自身的生存并能自我复制。但是，这种自我复制的分子集合是怎样从原初由氢原子和更大原子组成的分子的气云凝结而成，那团气云又是如何从尘云凝成了早期的地球？我们，像原始智人一样，需要有个关于创世的神话。这一次，有着 20 世纪末期的科学水平，我们也许能碰巧找到真理。

关于生命的理论

过去的几百年中，生命起源的问题历经多次大的变迁。这是不足为奇的。千年以前的西方传统中，想到这个问题的大多数人认为，生命是从无生命中自发形成的。蛆虫好像是无中生有，从水果里生出，从腐木中生出，不数日，由虫而蛹，由蛹羽化而为成虫。生命不请自来，哪儿腐朽潮湿，哪儿就有戏。自发产生乃是上帝造物的日常奇观，每日每时，司空见惯，永不停息。

百多年前，路易·巴斯德(Louis Pasteur)做了一些聪明的实验，关于生命的理论终于显出了现代的模样。一个人的头脑竟然做了这么多。关于生命自发产生的理论，巴斯德做了一些最有说服力的实验。这些实验是有人奖励他做的。他在被认为本来没有生命的溶液中培养出细菌的群落。巴斯德疑心，那些细菌的来源就是空气本身。因为，他的前驱们使用的烧瓶是开放的，而且那些烧瓶的形状也很容易令细菌飘入培养基。巴斯德开始制作曲颈的烧瓶，瓶口成 S 形。他希望，任何外来的细菌都会在进入开口时被困住，而到不了培养基。像这样简单而优美的实验我们是最乐于见到的。巴斯德在他的无菌培养基里面没发现任何细菌生



长。他由此得出结论：生命来自生命。

但是，如果生命只能来自生命，那最初的生命又从何而来呢？所以，出了个巴斯德，生命起源的问题忽然变得严重了：它变得巨大，深奥，神秘，也许不可言说，或许是科学本身所无能为力的。先是，炼金术导致了化学，进而又导致对于无机物原子和分子的分析研究：人们分析了铅，铜盐，金，氧气，氢气，等等。可是，生物体包含一些无生命物质中所见不到的有机分子。一时间，人们曾经怀疑，生命与无生命之间的分别，源自这些分子的不同。鸿沟之上没有桥梁。后来，到了19世纪中叶，弗里德里希·维勒(Friedrich Wöhler)合成了尿素。这是种有机化合物，但又明明是从无机物造出来的。生命到底还是由跟无生命物质一样的东西组成的。费希尔(Fischer)研究结果的隐含意义是：寻常一样的物理和化学原则可能既制约着无生命物质，也制约着生命物质。他的成就把生物学推进了一大步，这个进步把生物学还原为化学和物理学。在某种意义上，生命自发产生说的信徒们毕竟没有错：说来说去，生命还是从无生命来的，尽管那个变出生命的戏法远比他们预想的要复杂得多。

然而，那个还原论的命题，就是说生命基于跟无生命相同的原理的理论，并不是很容易接受的。因为，即使人们认为生命跟无生命理所当然是从同一块布料裁出来的，也并不是说，光有布料就够了。尽管俗话说，“人是衣裳马是鞍”，可真要较真儿的话，光有衣裳是成不了人的。对生命这一玄妙的现象，法国哲学家亨利·柏格森(Henri Bergson)提出了一个答案，他的答案在几十年里说服了好多人。他的答案是“生命冲动”。他的生命冲动也很玄，玄得像飘渺的法国香水一样。没有它，肉体不过是一堆肉。据说，生命冲动是一种非实在的精华，是它渗透并激活了细胞中的无机分子，使其有了生命。听起来有点傻。可是，真的就那么傻吗？我们很容易自以为是，直到自己喜爱的信念彻底破



灭。但是，不管你喜欢不喜欢，有些事还是发生了。不久前有研究者显示，青蛙的肌肉表现出生物磁性——现在更恰当地被理解为电位变化沿神经和肌纤维扩散——麦克斯韦的磁场本身不就是非实在的吗，然而，它却能控制物质，让物质跟着它动。如果非实在的磁场能移动硬邦邦的物质，那么，非实在的生命冲动就不能激活无生命吗？

柏格森不是惟一个提出这种生命力说的深思者。汉斯·德莱希(Hans Dreisch)，一个绝顶聪明的实验派，得出了非常相似的结论。德莱希在两个细胞的青蛙胚胎上做了个试验。像其他的胚胎一样，那个受精卵，或称合子，不断地分裂，生出了2个、4个、8个、16个细胞，一直下去，直到一个生物体降生。德莱希用一根极细的婴儿头发丝做成一个套圈，把两个细胞拨弄开，让它们自由地各奔东西。让他大吃一惊的是，每一个细胞竟然都发育成完全正常的青蛙！甚至从后来包含4个或8个细胞的胚胎中分离出任何一单个细胞，那个细胞都能发育成一个完全成熟的青蛙。

德莱希不是傻瓜。他意识到，他两手捧着一个海样大的难题。看样子，整个牛顿物理化学体系中都没有任何明显的东西，能为解释这一结果提供一点点希望。假如那个胚胎的每一个部分都只生出成体的一个部分，那还好接受一些；实际上，在许多物种那里就是这种情况，被称为嵌合式发育。有一帮子人用所谓的“胚中预存说”来解释嵌合式发育。那个学说假定，卵子内住着个小矮人，就是成体的小小缩影，它的每一个部分都会扩张为成体的对应部分。因此之故，如果抹去半个卵子，就是合子姐妹细胞的一个细胞，那么，按理说应该就是抹去了小矮人的一半。剩下的半个卵子应该长成半只青蛙。但那样的事情没有发生。就算发生那样的事情，胚中预存说也还是有着灭顶的难题：它该如何回答，生成的这半只青蛙会生出怎样的青蛙，那半只青蛙生出的



青蛙又会生出怎样的青蛙，等等，等等，如此这般？胚中预存说的信奉者提出，可以用这样的设想来解决这个问题：那个卵子中，住着个小矮人，小矮人里面还有个小矮人，就像那个中国故事里的玩偶那样，一路下去，直到造物的创世。这么说来，假如生生不息永远下去的话，当然就需要有一个小矮人的无限序列。可是我在此坦白，对那些过时的想法，我的同情心已经消失殆尽。有些理论，哪怕已被证明是错了的理论，可能也是优雅而美丽的，有些理论可能是离谱的。可是，假如一个理论需要无穷无尽越来越小的小矮人来支持它，那就未免太离谱了。

德莱希做了一个很重要的发现。如果那个 2 或 4 或 8 细胞的胚胎中的每一个细胞都能生出一个完整的成体，那么，必须有什么地方提供信息令细胞成长。固然，秩序多多少少是自发产生的。每一个部分都能生出一个整体。但是，在每一个部分里面，那个信息发自何处呢？德莱希乞灵于一个称作生命原理的学说，就是一种非物质的秩序之源，它给胚胎那一点点东西注入了生命，不知怎么让每一部分具有了奇迹般生出整体的能力。

到 19 世纪末叶，生命起源的问题沉寂了下来，无声无息地寂寞了 50 多年。大多数思想者，要么认为那个问题是科学无法接近的，要么，往顶好处想，也是为时尚早，怎样努力也毫无希望。直到 20 世纪中叶，才有人重新注意到这个问题，认为是某种原始地气给了化学物质以生命。有很好的证据——当然现在已经有人怀疑——暗示，原始地气含有丰富的分子种类，比如氢，甲烷，二氧化碳等等。那时候几乎没有氧气。后来，人们又进一步设想，原始大气中简单的有机分子，加上一些较为复杂的分子，可能会慢慢溶解于刚刚形成的海洋里，造成了某种前生物汤。从这种前生物汤中，不知怎么自发生出了生命。

这个假说至今还有很多信徒，尽管它面临相当多的困难。有个主要的难题就是一个事实：那道汤必定是非常的稀淡。化学反



应的速度取决于参加反应的不同种分子相互碰撞的速率，而分子碰撞的速率又取决于它们的浓度。假如每一种分子的浓度都很低，那它们相互碰撞的几率就非常之低了。在稀淡稀淡的前生物汤里，化学反应实在是慢极了。我新近读到的一组卡通画极好地捕捉到这一想法。卡通画的题目就叫做“生命的起源”。画上写的日期是“38.74 亿年前”。在一个不毛的石壁的底下，两个氨基酸飘来飘去飘得很近了。3 秒钟以后，两个氨基酸又飘远了。过了 412 万年，两头氨基酸又在一个远古的石壁下飘近了……是啊，罗马不是一天建成的，好事多磨呵。在这么一种稀淡的媒体里面，就算我们有耐心等到它地老天荒，生命究竟还能成形吗？我们一会儿就回过头来做点不幸的计算，我发现这样的计算虽然容易出错但也蛮有趣味，计算结果显示，按照概率，给它几十亿倍于宇宙年龄的时间，生命都不会成形。对那个理论来说，这是多么不幸呵，因为，此时此刻我正坐在这儿写东西给您看哪。看来，肯定是什么地方有什么东西出了错。

亚历山大·奥巴林（Alexander Oparin, 前苏联生物物理学家）提出了一个表面上讲得通的途径来解决稀淡的原初汤里产生生命这个问题。把甘油跟其他分子混合，就形成一种凝胶状的结构，叫做 coascervates。那种 coascervate 能把它内部的有机物分子浓缩，并越过边界与外界分子进行交换。一句话，coascervate 就像是原始的细胞，把其内部分子的活动从周围稀淡的汤水划分开来。假如那原始的汤水里产生出这样的小小舱室，它们就可能浓缩出形成代谢所需的合适的化学成分。

就算奥巴林为理解原生细胞的形成打开了一扇门户，我们还是不知道那种原生细胞的内容物——那些小的有机物分子，它们的来来往往构成代谢——从何而来。那种原始细胞里，除了一些简单的分子，还有一些多聚物，那是些长长的分子链，是几乎完全一模一样的建筑砌块。可是，构成肌肉、酶和细胞骨架的蛋白



质却含有 20 多种氨基酸链条。这种线性的基本结构进而折叠起来，形成比较紧凑的三维结构。DNA 和 RNA 就是由 4 种核苷酸链条形成的建筑砌块构成的，那 4 种核苷酸是：DNA 中的腺嘌呤，胞嘧啶，鸟嘌呤，胸腺嘧啶，RNA 里是尿嘧啶取代胸腺嘧啶。若没有这几种分子作生命的基本物质，奥巴林的 coascervates 就无异于空壳。那么，这一些建筑砌块会是从哪儿来的呢？

1952 年，斯坦利·米勒(Stanley, Miller)忽发奇想，进行了一些大胆的试验。那时候他还是个年轻的研究生，在大名鼎鼎的化学家哈拉尔德·尤里(Harold Urey)的实验室里作助手。他在一个烧瓶里装了几种气体——甲烷，二氧化碳，等等——据说那几种气体存在于原始地球的大气里而。他用电火花轰击烧瓶——据说闪电是生命形成的能量来源。然后就等待着，希望能看到一份家酿的伊甸园。几天之后，他的努力有了回报，似乎能看出某种分子的创生：一种油腻腻的东西黏附在烧瓶壁上。分析之下，那种焦油状的物质原来包含了多种多样的氨基酸。米勒做了第一个前生物化学实验。他发现了早期地球上形成构建蛋白质所需砌块的可能途径。他由此得到了博士学位，从那以后就一直是前生物化学领域里的领头人。

类似的实验表明，有可能——尽管更加困难——形成作为 DNA 和 RNA 建筑砌块的核苷酸和油脂分子，并进而通过它们形成细胞膜的结构材料。后来，生物体的许多其他小分子组成成分也以非生物的方式合成出来。

然而，实质性的难题依然存在。罗伯特·夏皮罗(Robert Shapiro)在他题为《生命起源：对于创生说的质疑》的书中指出，就算科学家能够证明有可能合成组成生命的种种成分，也不容易把它们编排成一个连贯的故事。呵，有一帮子科学家发现，在一组特定的条件下，分子 A 可能以极其缓慢的速率产生于分子 B 和分子 C。然后，在证明有可能产生出分子 A 之后，另一帮子



科学家开始用较高浓度的分子 A 做试验来证明，加上分子 D，就可以形成分子 E——速率同样的缓慢，且需要迥然不同的一组条件。再然后，又一帮子科学家证明，用较高浓度的分子 E，可以形成分子 F，当然，需要的条件又是大不相同。然而，在没人管的情况下，怎么能在同一时间、同一地点形成所有的建筑砌块，而且有足够的浓度，一起来到，创作出一个会代谢的体系？夏皮罗论道，你这个戏台上，场景切换得也太多了，更何况还缺个舞台调度。

基因分子结构——大名鼎鼎的 DNA 双螺旋结构——的发现，引起又一次关注生命起源的浪潮。1953 年，詹姆斯·沃森 (James Watson) 和弗朗西斯·克里克 (Francis Crick) 发表了他们那篇有名的论文。在此之前，关于遗传物质究竟会是蛋白质还是 DNA，生物学家和生物化学家们一向见仁见智，争论不休。那些赞成蛋白质是基本遗传物质的人们有很多说辞来支持自己的假说：最显而易见的是，几乎所有的酶都是蛋白质的。酶当然是最主要的一类生物触媒，它们跟基质相连，加速形成代谢所需的反应。此外，细胞中许多结构性分子都是蛋白质。一个熟悉的例子就是血红蛋白，这种蛋白质见于血红细胞，担负固着氧气、并将其从肺脏传输到身体各部组织的重要使命。由于蛋白质无处不在，既为细胞搭架，又维持代谢之流，是人体这部机器的耐用部件，所以，推测这些复杂的氨基酸多聚物同时又是遗传信息的载体，也是合情合理的。

然而，以孟德尔 (Mendel) 打头儿的一系列严谨的科学家却指出，见于每一细胞中的染色体才是遗传信息的载体。相信大多数读者会熟悉孟德尔在 19 世纪 70 年代对甜豌豆所做的漂亮的实验。那时候，原子论已经深入人心，因为方兴未艾的化学科学已经发现有强有力的理由认为，原子是物质的基本建筑构件，化学反应从成简单整数比的原子中形成分子。水就是确切的 H_2O ——



两个氢原子（决不会是两个半）和一个氧原子。

假如原子管着化学反应，那么，难道不会有管遗传的原子吗？子女长得多多少少像父母。若这种相似性是由遗传原子造成的，那就是有些原子来自父亲，有些原子来自母亲。但是，父母各有自己的父母，往上追溯，祖父母的数量可至无穷。假如所有遗传原子都传给子女，那么，累积的遗传原子的数量必然会大得可观。为了不出现这种情况，一般说来，每个子女只应得到父母两造的一半遗传原子。最简单的假设是，为形成每一特征，每一个子女从父母每方都得到正好一个遗传原子。那两个原子合起来将决定那一特征，比如，是蓝眼睛而不是棕色眼睛，这一特征又会进一步传给下一代。

孟德尔最初发现这些规律的时候，谁也没有理会他。1902年，有人重新发现孟德尔定律，整个生物学界为之振奋。染色体——之所以这样命名，是因为它们在显微镜下呈现不同的颜色——从植物和动物的细胞核里分辨出来。在细胞分裂，也就是有丝分裂时，细胞核同时分裂。核内的每一个染色体首先复制成双，然后把一份拷贝传给每一个子核，这就等于把一份拷贝传给每一个子细胞。可是，更加动人的是减数分裂，就是形成精子、卵子的那种细胞过程。在减数分裂中，到达精子或卵子的染色体的数目恰好是体内其他细胞的一半。只有当卵子与精子结合成一个合子时，遗传基因才又凑到足数。体内的每一个正式细胞——称体细胞——都含有成对的染色体，其中一个来自父亲，另一个来自母亲。进一步的研究表明，在卵子或精子形成时，每一对染色体中来自父方和来自母方的一个，都是随机选择，然后传下来的。由于孟德尔定律要求，双亲两造对下一代各传一半遗传指令且随机择传，如下的结论几乎就是不可避免的：染色体必定是遗传信息的载体。到20世纪40年代，欣欣向荣的实验遗传学无可辩驳地确认了这一信念。



可是，染色体基本上是由一种叫做 DNA，也就是脱氧核糖核酸的复杂多聚物构成的。所以，很有可能，基因（从前叫做遗传原子），是由 DNA 做成的。微生物学家奥斯瓦尔德·艾弗里 (Oswald Avery) 做的一个有名的实验解决了这一问题。艾弗里诱使一些细菌接纳了来自其他细菌的一些纯种 DNA。受体细菌后来就表现出给予方的一些性状，而且，这些新的性状在受体细菌分裂时稳稳当当地遗传了下来。DNA 果然能携带可代代相传的遗传信息。

于是，一场竞赛开始了。研究者争先恐后地要去发现，DNA 到底有哪些性质，使它能够编码这种信息。关于带有一些补充束的双螺旋结构的故事是人人皆知了。DNA 被奉为生命的主导分子——这一看法我既同意，又深深地不同意——是由 4 种核苷酸基组成的双螺旋。4 种核苷酸是：腺嘌呤 (A)，鸟嘌呤 (G)，胞嘧啶 (C) 和胸腺嘧啶 (T)。大多数读者都知道，DNA 的神奇之处，在于它那特定的碱基配对儿：A 跟 T 相连；C 跟 G 相连。遗传信息就是在那个双螺旋带的某个束的基序列上携带着。三个一组的基——AAA, GCA, 等等——确定了每一种氨基酸。于是，碱基序列可以由细胞翻译成一种特定的氨基酸序列，形成一种特定的蛋白质。

面对 DNA 双螺旋结构如何直接意味着分子复制的方式，要想不惊奇是不可能的。每一个束都通过确切的 A-T 或 C-G 配对儿的方式确定了补充束中核苷酸的顺序。假设有互补的两个束，一个叫做沃森，另一个束叫做克里克。知道了沃森束上的顺序，也就知道了克里克束上的顺序。

假如 DNA 是一个双螺旋结构，其中，每一个束都与其他束的互补；假如沃森束上的碱基序列确定了克里克束上的碱基序列，并且反之亦然，那么，DNA 双螺旋结构也许就是一种分子，它能够自发地复制自身。简言之，DNA 成了活分子的首选。大家



兴高采烈地认为，这种分子就是现存生命形式的主导分子，是遗传程序的载体，通过它，生物体就可以由一个受精卵精确地长出来。在生命的黎明时期最早会自我复制的，可能也正是这个神奇的分子。它会繁衍，最终碰到了配成蛋白质的药方，给自己做成了外套，并且通过催化而加速了蛋白质的反应。

然而，那些希望相信生命始于核酸的人们，尚要面对一个与他们不太方便的事实：裸 DNA 并不会自我繁衍。生物学家马太·梅塞尔逊 (Matthew Messelson) 和富兰克林·斯塔爾 (Franklin Stahl) 随后进行的研究显示，细胞染色体里的 DNA 的确复制了不少，正像它的结构意味的那样。沃森就是确定了新的克里克；克里克也的确确定了一种新的沃森。可是，这种细胞之舞还要有中介人，那就是一大堆蛋白酶。

看来，那些试图找到最初的活分子的人们怕是要到别的地方去努力了。果然，没过多久，又一个多聚物跳进了生物学家的视野。RNA，也就是核糖核酸，乃是 DNA 的最亲近的表兄，在细胞的行为中起着中心的作用。像 DNA 一样，RNA 也是一种由 4 种核苷酸基构成的多聚物：A、C、G 都不少，只是少了 T 而多了尿嘧啶 (U)。RNA 能够以单束的形式存在，又能以双螺旋的形式存在。像 DNA 一样，RNA 的两条螺旋束也是互补的模板。在细胞中，生成蛋白的信息是从 DNA 拷贝到一条称作信息 RNA 的束上，又进而引渡到一些称作核糖体的结构上。在这些地方，在另一种 RNA 分子——转型 RNA——的帮助下，蛋白质于是编织而成。

对于许多科学家来说，RNA 两条束带的模板互补性质，就意味着，RNA 也许能无需蛋白酶帮忙就能自我复制。这样，生命可能起源于 RNA 的繁衍。RNA 分子就好比是一些裸基因——有时人们这样称呼它们。可是，让 RNA 带束在试管里拷贝自身的努力却失败了，这大约是可悲的事吧。但那个想法是简单而美



丽的：在烧杯里放上高浓度的特定种类的一个单束序列——比如，癸核苷酸 CCCCCCCCCC。在此之上，加上一些高浓度的自由 G 核苷酸。每一个 G 分子都应该在沃森 - 克里克碱基配对的作用下跟癸核苷酸上的一个 C 核苷酸排起队来。如此，就会有两条一套 10 个的 G 单聚物分子串并排。剩下的事情就是，那 10 个 G 单聚物核苷酸通过合适的键连接在一起。要是那样，分子生物学家们称之为多 G 十分子串的结构就形成了。如此，那两个串，多 G 串和多 C 串，只需化解开，让最初的多 C 十分子串自由地跟另外 10 个 G 单聚物排起来，产生出另一个多 G 十分子串。最后，当然了，试验者希望会得到一种分子复制系统，就是新创生的多 G 十分子串，GGGGGGGGGG，并进而能够把加进烧瓶的任何自由的 C 单聚物排起来，让自由的 C 单聚物排在一起，形成多 C 十分子串，CCCCCCCCCC。假如这一切都如期发生，而且在没有任何酶的情况下发生，那么，这样的一个双束 RNA 分子就真的会是一个会自我复制的裸 RNA 分子了。那样的一个分子就会是最初活分子的强有力的候选人了。

这个主意轻巧而可爱。然而，试验却屡试屡败。失败的方式非常有教育意义。首先，4 种核苷酸各有自己的化学个性，导致试验失败。单束的多 G 串往往会蜷缩，C 核苷酸两两连接，成一发卡形，结果产生了一团互相缠绕的乱麻，作不了自我复制的模板。从一个 C 和 G 的单聚物的序列出发，其中 C 的丰度大于 G 的丰度，是不难造出一个补充串的。可是，那个补充串又必定是 G 丰度大于 C 丰度的，所以倾向于蜷曲回自身而退出局外。沃森作成了克里克；克里克却俯首看着自己的肚脐，拒绝游戏。

即令拷贝并不因鸟嘌呤的缠绕而停止，裸 RNA 分子还是要受一种叫做错误灾难的情况之害：在把一种串拷贝到另一种串上的时候，误置的基——在本该是 C 的地方误置了一个 G——就会把那个遗传信息毁掉。在细胞中，这样的错误由一些做校对工作



的酶控制在最低限度，保证拷贝不走样。偶有错误漏网，就形成那些推动了进化的突变；大多数错误是有害的，可偶尔还是有那么个把错误，会把该生物体推到一个比较更适于生存的境地。但是，如没有酶来防止鸟嘌呤的缠绕，由于拷贝错误和其他错误，一条 RNA 信息很快就变得不知所云。可是，在一个纯粹的 RNA 世界里，酶又从何而来呢？

有一些相信生命源自 RNA 的人们，在寻找着突破这一难题的途径。他们争论道，也许，有一个更为简单的自我复制的分子早于 RNA；它不受鸟嘌呤缠绕和其他难题之苦。目前还没有任何实验工作明确地支持此论。假如此说讲得通，我们还是要面对那一问题：进化是如何把那个较为简单的多聚物转化成 RNA 和 DNA 的呢？

如果酶在复制中是绝对必需的，那么，那些相信 RNA 首先问世这一主流观点的人们就必须寻找一些途径，让核酸可以自己扮演催化剂的角色。仅仅 10 年之前，大多数生物学家、化学家和分子生物学家们还坚持认为，细胞中的催化分子无一例外地是蛋白酶，而 DNA 和 RNA 则都是至关重要的、化学性质不活跃的信息库。隐隐约约有一种想法，认为，RNA 也许更活泼、更重要吧。有这种想法的人可能是从一个事实那儿嗅出来一点气味，那个事实就是：特殊的 RNA 分子，称作转型 RNA 的，起着关键的作用，很难说它在把遗传密码翻译为蛋白质的过程中作用不积极。更何况，细胞中完成翻译工作的分子机器——核糖体，基本上是由 RNA 序列加上一些蛋白质组成的。这一机制在整个生命世界里几乎是普遍存在的，因而可能是从生命之初就存在了。但是，只有到了 20 世纪 80 年代末，托马斯·切赫(Thomas Cech)和他的同事们才做出了那个令人震惊的发现：RNA 分子本身就可以起酶的催化作用。这样的 RNA 序列叫做核糖酶。

当 DNA 信息——制造蛋白质的指令——拷贝到一串信使



RNA 上的时候，一定量的信息被忽略了。这样说来，细胞不但有着管校对的酶，还有管编辑的酶呢。序列中含有遗传指令的部分，应该从那些无稽之谈的部分分离出来。这么说，这样的酶是用来从 RNA 中剪除掉无稽之谈，而把遗传信息拼接到一起来的。如此剪接之后，相邻的遗传信息序列复又经其他方式加工处理，从细胞核那儿运走，找到一个核糖体，进而被翻译成一种蛋白质。切赫不无惊异地发现，有些场合中，并不需要有蛋白酶来做这种编辑加工。RNA 序列自己就充当了一种酶，剪掉自己的无稽之谈。这些结果让分子生物学界的人士大吃一惊。现已知道，有多种多样的核糖酶，在多种多样的反应中起着催化作用，有时对自身起作用，有时对其他 RNA 序列起作用。比如，有一种能够把一个 C 核苷酸从一个序列端部转移到另一个序列的端部，使 $(CCCC) + (CCCC)$ 产生出 $(CCC) + (CCCCC)$ 。

没有蛋白酶的时候，RNA 分子在自我繁衍的事上显得笨手笨脚。可是，也许 RNA 核糖体可充当一种酶，催化 RNA 分子的繁殖。也许，这种核糖体可对自身起作用，复制自身。不管用哪种方式，一个自我繁殖的分子，或者是一个分子系统，可能近在手边。生命就要粉墨登场了。

要紧的是弄清楚，到底指望这种核糖体做什么事。遗传信息是负载于核糖体基的序列上。如此，CCC 不同于 UAG。假如一串 RNA 分子是 UAGGCCUAAUUGA，那么，当它的互补串合成时，新长成的序列应该是 AUCCGGAUUAACU。随着每一个新核苷酸的添加，就必须在 4 个可能的核苷酸中做出恰当的选择，而且还得形成恰当的选接。蛋白酶能够完成这种精细的选择，所以叫做聚合酶。RNA 和 DNA 的聚合酶对于细胞中 RNA 和 DNA 序列的合成是至关重要的。但是，却不容易找到一个 RNA 序列能够起到这个聚合酶的作用。然而，这样一个核糖体聚合酶是完全可能存在的。生命的黎明时可能有这样一种分子在场。



话又说回来。没准儿事情不是这样。说实在的，有个严重的难题打击着这个核糖体聚合酶假说。就算有这么个精细的分子生出来，它能够在突变减损中存活下来吗？并且，它会进化吗？两个问题的答案很可能都是否定的。这个难题就是某种形式的错误灾难。化学家莱斯利·奥戈尔（Leslie Orgel）在讲到遗传密码时描述了这个灾难。给一个能够起到聚合酶作用的核糖体画出一幅画像，拷贝任何 RNA 分子，包括她自己。只要供给核苷酸，这个核糖体就会成为一个会复制的裸基因。可是，不管是什么酶，都会在同时发生的副反应中加快那个正确的反应。错误是在所难免的。自我繁衍的核糖体必定会产生突变型。但是那些突变型核糖体在自我繁衍时往往不如正常的或野生型核糖体那么有效，从而很可能更加频繁地出错。这些较为懒惰的核糖体将会在复制自身时在每一拷贝中比野生型核糖体造出更多的突变型。更糟的是，懒惰的突变型核糖体能够催化野生型核糖体的发育，而创造出更多的突变型。几轮下来，那个系统可能会产生出一套出格的突变型变种。果如此，那么，原来那个核糖体，本来是能够忠实地拷贝自身和另外的核糖体的，现在却在一团懒惰的催化剂里失去了自己，这些催化剂导致一个 RNA 序列的系统，它在催化方面缺乏活力。在失控的错误灾难中，生命可能消失。我不知道如何详细地分析这样一个特殊的问题，可是我想，这样一个自我繁衍的核糖体出现错误灾难的潜力值得认真分析，提醒人们警惕本来是一个非常有吸引力的假说。

这一个关于生命始于裸 RNA 分子的假说有种种问题，其中，我发现有一个问题最难以逾越、最少被谈论，这就是：所有的活物似乎都要有一个最低限度的复杂性，低于这个限度，它就不可能存活、延续。最简单的自由活细胞叫做 *pleuromona*，那是一种简单的细菌，全身披挂，有着细胞膜，基因，RNA，合成蛋白质的机制，还有蛋白质——全套标准行头。*pleuromona* 的基因的



估计数目诸说不一，有人说也就有几百个，也有人说得有上千个，而相比之下，埃希大肠杆菌（*Escherichia coli*），我们肠道里的一种细菌，估计有 3000 个。*pleuromona* 是我们所知的最简单不过的活物了。这下你的好奇心该提起来了。病毒是比 *pleuromona* 小得多，可它们不能自由存活。它们是些寄生生物，侵入细胞里，利用细胞的代谢机制来完成自己的自我繁衍，逃离寄主细胞，再入侵另一个细胞。而所有自由生存的细胞却至少有 *pleuromona* 那样的最低限度的分子多样性。读到这里，你的触角可能会稍稍颤动了一下。为什么要有这个最低限度的复杂性？为什么一个系统要活着就不能比 *pleuromona* 更简单？

RNA 创世的支持者能够提供的最佳答案是，进化就是这么个故事嘛，这个答案，让鲁迪亚德·吉卜林（Rudyard Kipling）和他关于动物多样性的想入非非的故事大为露脸。在医学院里，我听说，有一块多孔的、网状的骨头，叫做 *cribiform plate*，构成了鼻子和额头的结合部。老师对我们解释了这块骨头的进化原理：这块骨头既轻又结实，很适合于它的功用。好吧。假如这一块 *cribiform plate* 是一块硬邦邦的疙疙瘩瘩的骨头，造成了一个筒状的突起，为我的大鼻子搭着凉棚，我一点也不怀疑，我的教授又会为这个硬邦邦的大疙瘩找到某种用途，比如说，它是高度适应脑袋撞墙的产物。进化就是这样充满了“就是这样”的故事，一些言之凿凿的剧情说明，可是找不到半点的根据；这是我们乐于讲述的故事，但我们的心智可不能依赖它们。

关于为什么简单的、会复制的 RNA 能带来一个世界，在其中，生命似乎只有到了某种复杂性临界值才能产生，吉卜林（既然话说到这儿，就不妨说开：还有大多数信奉进化论的生物学家们）会怎么说呢？答案是，这是因为，那些最早的活分子，在突变和适者生存律的驱动下，在自身周围聚集了一些代谢的法衣，膜，等 everything。最终，它们进化成我们今天拥有的细胞。穿着严



严的外衣，现存的最简单的细胞碰巧有了我们观察到的最低限度复杂性。可是，这一解释毫无深度。我们得到的，仍是一个“就是这样”的故事，言之凿凿，但不足以服人。并且，像所有“就是这样”的故事一样，它的言下之意是，事情很容易是另外一个样子。假如导致我们出现的一连串事故取了另一条道儿，我们真的就会在额头上长出角来。假如 RNA 分子沿另一条道儿攀升，那么，复杂性的临界值可能就大不一样：比 pleuromona 更为简单的东西就会存活下来。或者，换个样子，最简单的生物可能就是软体动物。

简言之，裸 RNA 和裸核糖体多聚物假说，对于我们观察到的所有自由细胞的最低限度复杂性没有给出一个深刻的描述。我坚持认为，我在第三章里描述的有序起源的原理还是说得通的。那个原理阐明，物质为什么必须达到某一特定的复杂性水平才能一跃而成为活物。这个临界值并不是随机变异和自然选择事故；我坚持认为，它是生命本质的题中应有之义。

生命的成形

照理说我们不应该在这儿。生命本来是不可能出现的。读到这儿，读者诸君中有的恐怕就要离开座位走人，对往下的说辞表示自己断然拒绝的立场。我劝诸公稍安勿躁，仅仅出于理性和礼貌，再考虑考虑，别忙着走开。现在我要陈述的说辞是由一些很能干的科学家所认真坚持，并非儿戏的。我相信，这一观点的失败，在于它未能理解复杂系统中自组织的深刻力量。我将会不遗余力地为你演示，不一会儿，这个自组织就可能使得生命的出现变成几乎是不可避免的。

关于地球上生命起源的学说，我们先从一个乐观的基调讲起。这些话是 1954 年诺贝尔奖获得者乔治·瓦尔德 (George



Wald)在《科学美国人》里讲的。瓦尔德说他纳闷儿，怎么就那么巧，正好是那一些分子、以恰到好处的方式凑合到一起，组成了一个活的细胞。只要想一想，做成这件事有多么不容易，不承认也得承认，生物体的自发产生是不可能的。可是，我们在这儿。瓦尔德接着讲，尝试许多许多次，那不可思议、不可能的事情就变得实际上非发生不可了。实际上，时间是情节的主人公。我们所说的时间是20亿年（瓦尔德这话是1954年讲的。现在我们说这个时间是40亿年）。给了这么多时间，不可能的变得可能了，可能的变得很可能了，很可能的简直就是稳稳当当了。你只要等待；时间自己会作出奇迹。

可是，批评者不干了。那些批评者可是些大名鼎鼎的人物呢。他们说，就算有20亿或40亿年的时间，也还不够从纯粹偶然的事件中生出血命来。多大的数量级也不行。罗伯特·夏皮罗在《起源》一书中算了笔账。他说，综观地球的历史，可以推想，由偶然的机会创造生命的尝试次数为 2.5×10^{51} 。这个数字海了。可是那就够了吗？我们需要知道每一次尝试有多少成功的几率。

接下来，夏皮罗使劲儿地计算了，偶然得出一个生命，比如埃希大肠杆菌，那概率有多大。他先是引述了两个天文学家的论调，一个是弗莱德·霍伊尔(Fred Hoyle)爵士，另一个是N·C·维克拉纳辛格(Wickramasinghe)。那两位写书人没有去估算得出一整个细菌的几率，而是算了算得出一个起作用的酶有多大的概率。他们从构建酶所需的20个一套氨基酸开始算起。假如这些氨基酸随机选择，随机排序，那么，得出一个包含200个氨基酸的实际细菌酶的几率会有多少呢？把那个序列中的每一个氨基酸排正确的机会，也就是1比20，乘以200，那就是 20^{200} 之一。这么个概率是很低的。可是，由于对一个特定反应起催化作用的氨基酸序列可能不止一个，两位作者承认，那个几率应该大一



些，就算有 10^{20} 分之一吧。可要命的是，为了要复制一个细菌，造出一个酶还不够。必须聚敛起大约 2000 种起作用的酶。生出细菌的概率是 $10^{20 \times 2000}$ 分之一。或者说，是 10^{40000} 分之一。这样的指数记数说说容易，想想可就难了。整个宇宙里的氢原子有 10^{60} 个。那么， 10^{40000} 就大而又大了。那是一个不可想象的超级天文数字。 10^{40000} 分之一是不可想象的不可思议。假如创造生命的尝试次数只有 10^5 ，成功的几率却只有 10^{40000} 分之一，那就是说，生命是不可能出现的。我们是幸运，我们是非常非常的幸运。我们是不可能的。霍伊尔和维克拉纳辛格放弃了自然发生的想法，因为那桩事的可能性，就可以跟一阵龙卷风刮过垃圾站，用其中的破铜烂铁装配起一架波音 747 相提并论。

因为你正在读着这本书，而我又在写着这本书，上面的论说肯定是哪地方错了。我相信，霍伊尔和维克拉纳辛格，还有其他许多人，是没有领悟到自组织的巨大力量。用不着一条一条地装配起一套特定的 2000 只酶，来进行一组特定的反应。我们在第三章就会看到，有一些很有力的理由让我们相信，只要集合起一些化学物质，其中包含了足够数目的不同种分子，就会有某种代谢从分子汤里成形出来。假如这样的论理是对的，那么，代谢的网络用不着一次一个部件地装配；它们可以从一道原初汤里面羽翼丰满地蹦出来。免费的秩序，我是这样称呼这件事的。假如我是对的，那么，生命的座右铭就不是什么“我们不可能”，而应该是“我们是注定要来的”。



第三章 注定要来的我们

是哪一天荒昧之日，见证了荒昧生猛、孕育大千的生命的诞生？自从第一圈代谢之魔法玩下来，度越春秋到你我，遥遥 40 亿年矣。其间消息，怎一个荒昧了得。是荒昧的天缘凑合？还是荒昧的不可能，决定了原本假以宇宙之年的几十亿倍之期也不会发生的事，然而竟然发生了？抑或是荒昧的无稽之谈，说我们这些东西是那么的不可理喻？

生命这东西真的像弗雷德·霍伊尔和 N·C·维克拉纳辛格算出来的那样，是一个不可思议的事故？情节的主人公真的是时间，像乔治·瓦尔德所称的那样？可是，我们今天已经相信，从地壳冷却，到有明确证据的细胞生命之间，仅有 3 亿年，而不是瓦尔德所称引的 20 亿年。瓦尔德的故事所需要的时间并不存在，而霍伊尔和维克拉纳辛格的天方夜谭所需的时间就更不存在了。假如我们这些活物是太大的不可能，那么，我们就是这个巨大时空中不可言说的神秘存在了。但假如这样的看法错了，假如有什么理由让我们相信生命是可能的，那么，我们在这个膨胀着的宇宙中就不是什么神秘之物，而是它顺理成章的一部分。

我的大多数同事都相信，生命初时甚简单，后来变复杂了。他们勾画了一幅图景：裸 RNA 分子复制了又复制，最后终于跌跌撞撞地组装起我们今天见之于活细胞中的所有复杂化学机制。我的大



多数同事还相信，生命绝对地依赖于模板复制的分子逻辑，就是我在第二章里写过的 A-T、G-C 的沃森-克里克配对儿。我倒是持有一个离经叛道的看法：生命并不依赖于模板复制的把戏，而是基于某个更深刻的逻辑。我希望让你相信，生命乃是复杂化学系统的一个自然属性，让你相信，当一道化学汤里的分子种类超过特定的临界数目时，一个自我支持的反应网络，一个自我催化的代谢机制，就会倏然出现。我想说，生命出现时并不简单，却是复杂而完整，从此以后就一直复杂而完整。这并不是由于什么生命冲动的缘故，而是因了一个从死分子到有组织的简单而深刻的转变，通过这一转变，每一个分子都依赖组织中其他分子的催化而形成。生命的秘密，繁衍的源头活水，并不在沃森-克里克配对儿之美，而在于催化闭合的达成。生命的根，比双螺旋结构更深：它直发化学本身。所以，在某种意义上，复杂、完整、自发的生命，终归还是简单的，是我们生活于其中的这个世界的自然产物。

我声称生命的出现是复杂化学系统里自然的相态转变，这一看法太过激进，跟过去的理论相去太远，我得慢慢解释。我们可知道，这样的看法至少在理论上是否始终一致？它从物理和化学上讲是否可能？有证据支持这样的看法吗？能获得证据吗？生命是否像我要说的那样开始？在现阶段，我们顶多可以说，好的、审慎的理论工作有力地支持我将要阐述的东西。那一工作看上去跟我们所知的复杂化学系统并无冲突。诚然，迄今还没有很多实验证据支持这一看法，但目前分子生物学方面的发展令人震惊，我们感到有望能够确切地造作出这些自我繁衍的分子系统——合成生命来。我相信，上述目标的实现，当在一二十年之内。

生命的网络

在第二章里我们讲到，大多数研究者目前正集中注意 RNA，



或 RNA 一样的单聚物有没有能力通过模板复制进行自我繁衍。这种注意是可以理解的。不管是谁，看着 DNA 或 RNA 那美丽的双螺旋，留意于沃森 - 克里克配对儿的规律，都禁不住会惊异于显然的自然选择之美。没错儿，莱斯利·奥格尔 (Leslie Orgel) 和他的同事们还没能让那些单聚物在没有酶的情况下复制繁衍，可这并不意味着他们的努力永不会成功。奥格尔在这上面大概已搞了 25 年；大自然用了大约 1 亿年。奥格尔绝顶聪明；全国健康学会的项目款三年一拨，就算这样，1 亿年也够长，可以让他尝试很多种可能。咱好不好试试另一条路子。试想，假如化学规律稍微有点不同，比如，氮原子有 4 个而不是 5 个价电子，有四条而不是五条键跟伙伴相连。且不要去管我这儿如何曲解量子力学——在阐明一个哲学问题时，谁都可以时不时离开量子力学，不让它毁了自己的论点。假如化学定律稍为不同，使得 DNA 和 RNA 那美丽的双螺旋结构成为不可能，那么，基于化学的生命还会是可能的吗？我不是希冀，我们会有那么幸运。我是希望，我们能为生命找到一个基础，那个基础比自我补充的模板更为深刻。

我相信，个中奥秘，就在于化学家称之为催化的东西。许多化学反应是非常艰难地进行的。假以非常之久的时间，几个分子 A 可能会跟几个分子 B 相结合，做成分子 C。但是，在某种催化剂——我们且称之为分子 D——存在的情况下，这个反应会像着了火一般，速度大大加快。人们通常用锁和钥匙打比方：A 和 B 恰好配进 D 的孔里，配合的方式正好更容易生成 C。我们将会看到，这个比方是极其简单化了的。可是，此时此刻，它恰好有助于阐明问题。一方面，D 是催化剂，能把 A 和 B 拉到一块儿生出 C，与此同时，分子 A、B 和 C 本身又可能在其他反应中扮演催化剂的角色。

本质上讲，一个活的生物体就是一个有能力催化自身繁衍的



化学物质系统。像酶这样的催化剂加速一些化学反应，这些反应没有催化剂也能发生，只是极其缓慢。在我所称的集体自动催化体系中，参加反应的分子加速着它们本身借以形成的那些反应：A 生成 B；B 生成 C；C 反过来又生成 A。现在让我们来设想一个由这种自我推动的回路组成的一整套网络（图 3.1）。给这个网络提供营养分子，它就能持续不断地自我再生。像寄寓在活细胞里面的代谢网络一样，这个网络将是活的。我要阐明的是，假如某个地方累积起足够多样的分子之混合，几乎肯定能产生出一个自动催化的系统，也就是一个自我维持、自我复制的代谢系统。如果是这样，生命的出现就会比我们原先想象的容易得多。

我要阐明的东西是简单的，却也是激进的。我认为，生命，从根本上来讲，并不依赖于沃森－克里克碱基配对儿的花招儿，也不依赖于任何其他特定的模板复制机制。生命，从根本上来讲，存

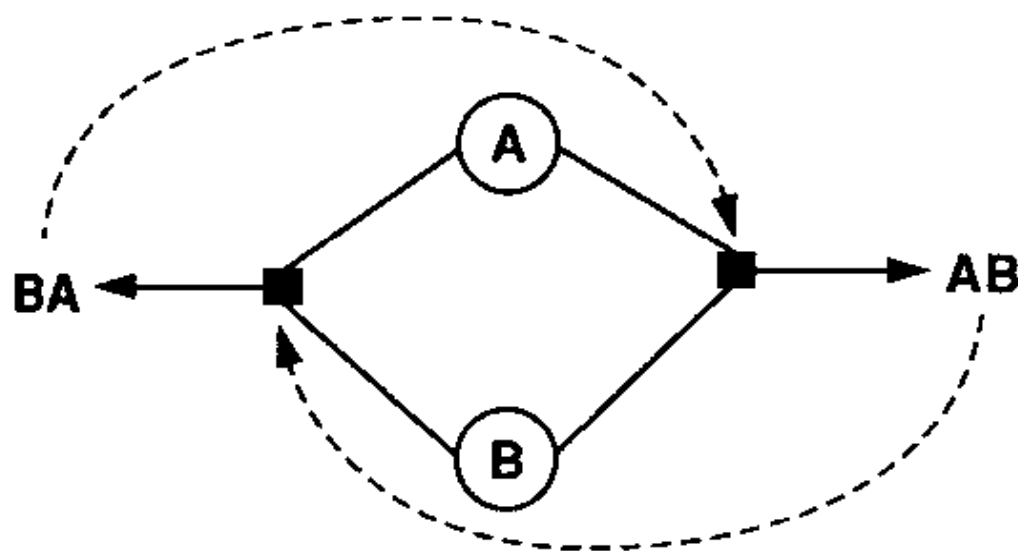


图 3.1 简单的催化闭合系统。这里的两个二聚物分子，AB 和 BA，由两个简单的单体构成。由于 AB 和 BA 可以对促成二聚物的反应产生催化作用，这个网络就是自催化的：只要有足够的分子原料（A 和 B），该系统就可以自给自足。



在于多种分子集合起来时那种催化闭合的品性。孤立时，任何种类的分⼦都是死的。合起来，一旦达成催化闭合，那个集体的分⼦系统就是活的。

你身体里的每一个细胞，每一个自由生存的细胞，都是集体自我催化的。在自在的生物体中，没有什么 DNA 分子光着屁股在那里管复制。DNA 是能复制，但只能在细胞之内那个由反应和酶构成的复杂的、集体行动的自动催化网络中才能做那件事。没有什么 RNA 能复制自身。细胞是一个整体，它的身世似乎难解，但并不神秘。除开“营养分子”不论，构成细胞的每一种分⼦都是由反应催化造出来的，而催化本身乃是由细胞造出来的催化剂带动的。我声⾳，要理解生命的起源，我们就必须理解，是哪些条件，使这种自动催化的分⼦系统的出现成为可能。

然而，生命光有催化还不够。所有活着的系统都要“吃”：它们摄⼊物质和能量以复制自身。这意味着，它们就是第一章里所称的开放热⼒学系统。

相反，封闭热⼒学系统不从自己的环境摄⼊物质或能量。关于封闭的热⼒学系统的行为我们已经理解了很多。百多年来，热⼒学理论和统计⼒学的理论都研究过这样的系统。相反，人们对开放热⼒学系统可能如何行为却所知甚少。这样的无知你用不着吃惊。34.5 亿年以来林林总总的生命形式大展放，不过是开放型热⼒学系统可能发生的行为的端倪初见⽽已。宇宙发⽣学本身也只是方兴未艾，因为自从大爆炸以来一直在演化的宇宙已经产⽣了关于星系和超星系的大规模信息。那些星系的结构和星体内部的核过程——那些过程产⽣了原子和分⼦，生命就是从那些原子和分⼦中兴起的——就是些开放型系统，由一些不平衡过程驱动着。我们对不平衡过程在展开着的宇宙中所具有的令⼈⽣畏的巨大创造力，才刚刚开始理解。我们⼤家——复杂的原子，木星，螺旋状星系，疣猪和青蛙——都是那个创造力的顺理成章的



子裔。

由于我要让你相信，生命是催化在一些足够复杂的不平衡化学系统中作出的天然成就，我最好还是抽出一点时间，给你简单勾画一下，催化到底作出了哪些成就，平衡和不平衡化学系统到底会有什么行为。这么说吧。化学反应是自发的，有的反应快些，有的反应慢些。一般来说，化学反应多少都是可逆的：A 能变成 B，B 也能变成 A。由于这些反应是可逆的，就容易想象，烧瓶里如只有某种初始浓度的 A 分子、没有 B 分子、也不再加入物质和能量，会发生什么。A 分子将开始变成 B 分子。与此同时，新产生的 B 分子也就开始变成 A 分子。一开始只有 A 分子，但随着反应的进行，B 分子浓度上升，上升到某一点，A 变成 B 的速率就正好等于 B 变成 A 的速率了。这个平衡称为化学平衡。在化学平衡状态下，A 和 B 的净浓度不再随时间推移而变化，只是任何特定的 A 分子都会变成 B 分子，再由 B 分子变成 A 分子，每分钟这么往来变化上千回。当然，这个平衡是统计学意义上的。A 和 B 的浓度都会随时波动。

化学平衡并不局限于一双分子 A 和 B，而会发生在任何封闭的热力学系统里。假如某个系统有数百种不同类型的分子，它最终会安顿下来，达到平衡，其中，任何一双分子间的正反应和负反应都将扯平。

催化剂，像蛋白酶、核糖酶等等，会加快反应速度，正负两个方向同样加速引入催化剂，A 和 B 的平衡并不改变；酶只是加快了平衡状态的到来。设若平衡时 A 与 B 的浓度比为 1，就是说，两种分子浓度相同。假如那个系统一开始不平衡，比如说，投入高浓度的 B 而没有 A，那么，酶的存在将会大大缩短到达 A、B 平衡的时间，实际上就等于加快了生成 A 的速度。

那么，催化是怎样产生的呢？原来，在 A 和 B 之间，还有个中间状态，称作转型态。在那个状态下，分子中一个或多个原子



间的联系被严重地伸拉、变形。所以说，处于转型态的分子很不幸福。不幸福的尺度是由分子的能量掌握的。能量低，分子里就没有伸拉。能量高，就有伸拉。想想弹簧。在原来的长度上，它是幸福的。一旦拉的比静止长度长些，它就积存起一些能量，就不幸福，而且有可能把能量释放出来，退回原来的长度，能量又变低了。

毫不奇怪，从 A 到 B 的转型态跟从 B 回到 A 的转型态完全一致。据认为，酶是通过跟转型态相连并使其稳定而起作用的。它的这一作用便利了 A 分子和 B 分子跃迁到转型态，加快了 A 到 B 和 B 到 A 的变化速率。这样，酶加快了 A 和 B 的浓度达到平衡的速度。

我们应该满怀感激，我们的细胞不处于化学平衡的状态。对一个活着的系统来说，平衡意味着死亡。相反，活着的系统是一些坚持不懈地打破化学平衡的开放型热力学系统。我们吃喝、排泄，像我们的远祖一样。能量和物质流过我们，建造起一些复杂的分子：它们成了生命游戏的象征。

开放的热力学系统所遵循的规律跟封闭型热力学系统所遵循的那些大不相同。让我们考虑一个简单的例子：取一烧瓶，不断地、匀速地从某个外在来源加入 A 分子，同时又取走 B 分子，取的速率跟 B 的浓度相关。A 还会跟从前一样变成 B，B 也跟从前一样变成 A，可是，由于不断加入 A 而取走 B，两种分子之间再也不像从前那样会达到平衡了。常识告诉我们，这个系统会稳定于某一状态，在该状态下，A 分子对 B 分子的比率将会高于一个封闭系统里两者的比率。简言之，A 与 B 的比率将会打破热力学平衡。总的来说，这一常识性的看法是对的。在简单的例子里，这种对物质和能量开放的系统，是会稳定于一个跟封闭热力学系统迥然不同的状态。

现在，再来考虑一个比这复杂得多的开放系统——活的细胞。



你身体里的细胞，在物质和能量流过其边界时，协调着大约100000种不同分子的行为。就连细菌也在协调着成千种不同分子的活动。竟然会认为，理解了非常简单的开放热力学化学系统，就会大大有助于我们理解牛气哄哄的细胞？没有谁理解那个充满了化学反应的复杂细胞网络及其催化剂是怎样行为的。实际上，这是一个谜，我们将在下一章着手讨论。可不管怎么，简单的热力学系统至少是个开端，它们本身已经够令人着迷了。甚至连简单的不平衡化学系统都能以令人绝倒的方式形成相当复杂的纹样——以化学浓度在时间和空间中的变迁而论的纹样。如我们在第一章所述的，伊里亚·普里高津称这些系统为耗散系统，因为它们持续地消耗物质和能量以维系自己的结构。

跟见之于热力学上开放的烧瓶那简单的稳态系统不同，在较为复杂的耗散系统中，各化学品种的浓度并不坠入稳态、历时不变。相反，各品种的浓度可能上下浮动，周而复始。这个过程称作极限环（limit cycles），一次能维持很长时间。这种系统还能产生奇妙的空间纹样。例如，有一个有名的别洛索夫-扎波廷斯基（Belosov-Zhabotinski）反应，有寥寥数种简单的有机物分子参加反应，展现出两种空间纹样。在第一种纹样里，蓝色的同心圆波纹在橘红色背景上从一个中心波动源向外扩散。蓝红两种颜色是指示分子产生的，它们显示出空间中任一点上反应混合物的酸碱程度。在第二种纹样里，一个个螺旋状的回形蓝色纹在橘红色背景上绕中心旋转（图3）。许多研究者研究过这样的纹样。吾友阿瑟·温弗里（Arthur Winfree）写过一本好书，叫做《时间崩塌之际：电化波和心律不齐电波的三维动态》的，就总结了该研究工作的一大部分。这些研究对人类最重要的含义是：心脏是一个开放的系统，而且，它的搏动规律类似于别洛索夫-扎波廷斯基反应的纹样。心律紊乱猝死的原因可能是心肌中的某种变化，相当于从同心圆纹样（稳律搏动）到螺旋纹样的转变。可以认为，蓝



色的扩散波相当于肌细胞里导致收缩的化学状况。这样，蓝色的均匀同心圆扩散波的纹样，相当于规则的收缩波。然而，在螺旋纹样里，蓝色的回形螺纹在近心处很密，离中心愈远就愈疏。纹样中近心处的密集对应于心肌的紊乱抽动。温弗里已经显示，简单的干扰，比如，振荡盛有别洛索夫-扎波廷斯基反应物的石皿，就可以把系统从同心圆纹样变成螺旋纹样。于是，温弗里提出，简单的干扰可把心脏从常态变成螺旋状紊乱状态，导致猝死。

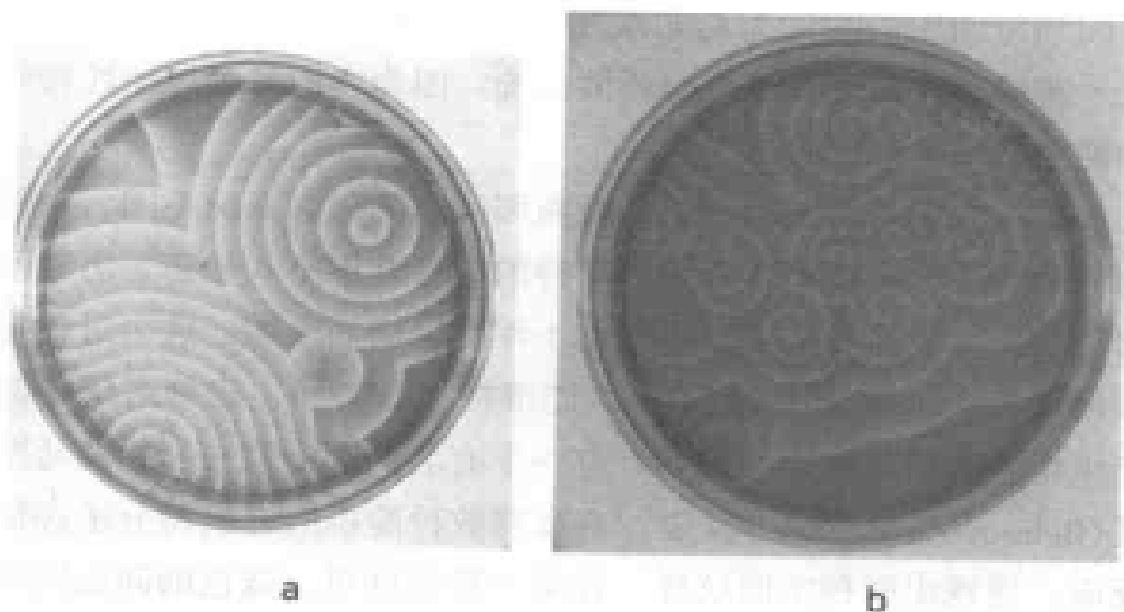


图 3.2 发生过程中的自组织现象。著名的别洛索夫-扎波廷斯基反应显示了在简单的化学系统中，秩序可以自发产生。a. 同心圆波浪向外扩展。b. 放射状扩展的风车形状围绕一个中心产生。

不平衡化学系统的较为简单的行为已得到充分的研究，亦可有多样的生物学含义。比如，这样的系统可以形成历久不衰的颜色深浅相间的条纹，颜色深的条纹指示较高的化学浓度，浅的条纹指示较低的浓度。许多人会认为，这样的系统所自然形成的纹样会大大有助于我们理解植物和动物发育中发生的空间纹样。别洛索夫-扎波廷斯基反应中出现的蓝橘相间的条纹，可能预言着斑马的条纹、海螺的条带纹样，还有见之于或简单或复杂的生物



体之形态发生学的其他性状。

不管这些化学纹样多么美妙，它们还不是活的系统。细胞不只是开放的化学系统，它还是一种集体催化的系统。细胞内不光发生化学纹样；细胞还作为繁殖的实体维持自身，使自己有能力作达尔文式的进化。是根据哪些规律、哪些深层的律条，在原初的地球上产生出自动催化系统？简言之，我们寻找的是我们自身的创生之谜。

一个化学的创世说

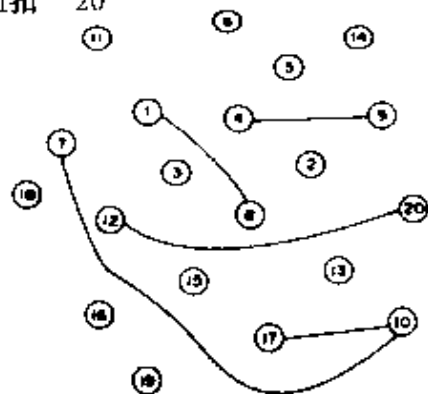
科学家们常常通过思考某个简单的玩具问题得到关于更加复杂的问题的洞见。我要告诉你的玩具问题，是关于“随机图样”

(random graphs) 的。随机图样是一组点，或一组结节，由一组线或边随机地连接起来。图 3.3 所示的就是一例。为了把这个玩具问题具体化，我们可以称这些点为“纽扣”，称那些线段为“线绳”。设想有一万颗纽扣分散在地板上。随机地捏起两颗纽扣，用一段线绳连起来。撂下这两颗纽扣不管。随机选择另外两颗纽扣，用一段线绳连起来。继续做下去。起初，你几乎肯定要挑选那些从前没挑选的纽扣。可过了一会儿，你更可能选中一对纽扣，而发现其中之一你已经挑选过。于是，当你用线绳把它们联系起来时，你会发现已经有三颗纽扣连在了一起。长话短说，当你继续随机挑选成对的纽扣用线绳连接时，过一会儿那些纽扣就开始彼此连接成更大范围的集，如图 3.3a 所示，只不过图示只用了 20 颗纽扣，而不是一万颗。随时捏起一颗纽扣，看它已经跟多少颗纽扣相连。在我们的图样里，已经相连的纽扣我们称之为部件。如图 3.3a 所示，有些纽扣没有跟任何其他纽扣连接。其他纽扣可能已连接成对，成三，或更大的数目。

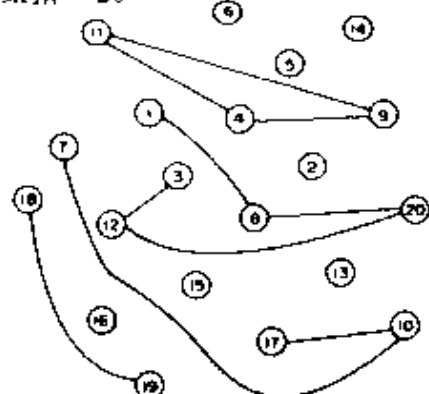
随机图样的一些重要特性显示，改变线绳与纽扣之比时，统



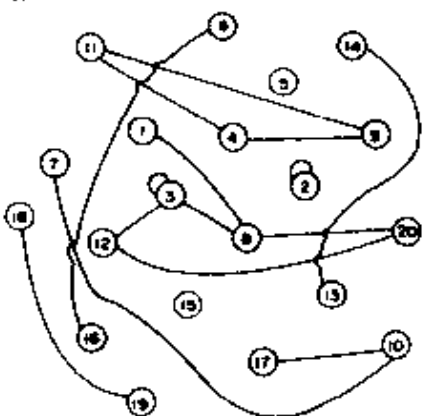
$$\frac{\text{连线}}{\text{纽扣}} = \frac{5}{20}$$



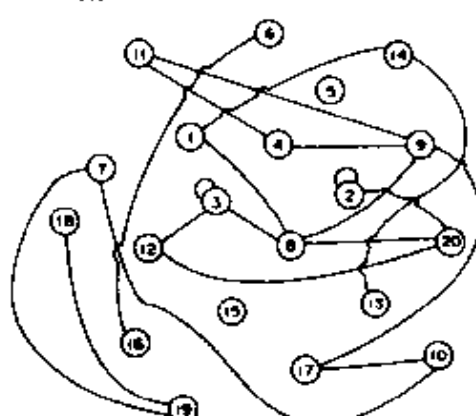
$$\frac{\text{连线}}{\text{纽扣}} = \frac{10}{20}$$



$$\frac{\text{连线}}{\text{纽扣}} = \frac{15}{20}$$



$$\frac{\text{连线}}{\text{纽扣}} = \frac{20}{20}$$



$$\frac{\text{连线}}{\text{纽扣}} = \frac{25}{20}$$

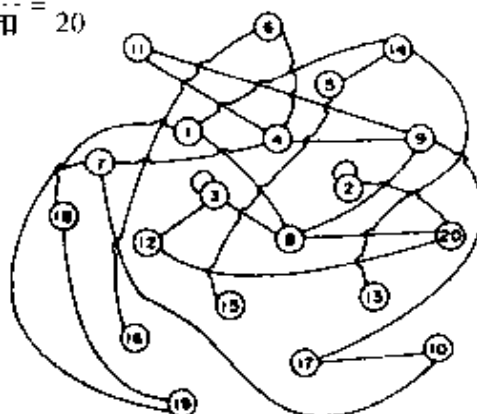


图 3.3 相互联系的网络的结晶化过程。20 个“纽扣”随机联系在一起，“连线”的数目越来越多。如果纽扣的量很大，他们之间连线的数目比例会越过 0.5 之限，那么绝大多数纽扣就会被连接在一起，形成巨大的整体。如果比例超过 1.0，任意可能长度的封闭道路就会出现。



计学上的行为非常规则。特别的一点是：当线绳与纽扣之比超过了 0.5 时，相态转变就发生了。在这一点上，会突然出现一个“巨人集”。图 3.3 显示了这一过程，仅用了 20 只纽扣。当线绳较之纽扣很少时，大多数纽扣还未被连接（图 3.3a）。然而，随着线绳对纽扣的比例增加，数目较小的集开始形成。线绳对纽扣的比例继续增加，纽扣集的规模也随之增长。很明显，随着集的规模的增加，集与集之间开始互相连接。奇迹出现了！一旦比例越过了 0.5 之限，突然间大多数集一下子连成了一个巨大的结构。图 3.3 所示的是一个 20 纽扣的小系统。你可以看到，当线绳与纽扣的比例为一半，也就是 10 比 20 时，这个巨人集就形成了。如果我们用一万颗纽扣，巨人部件将在用了大约五千条线绳时形成。一旦形成巨人部件，大多数结节都会直接或间接相连。捏起一颗纽扣，很可能就会牵动 8000 到 1 万颗纽扣。当比例过了 0.5 以后继续增加时，越来越多的孤立纽扣和较小的集合跟那个巨人部件联系起来。于是，那个巨人部件越长越大，但随着剩下的孤立纽扣和小集合越来越少，增长的速度也慢了下来。

线绳与纽扣之比越过 0.5 时，最大的那个纽扣集的规模发生的突然变化，我认为就是导致生命起源的相态转变的玩具版本。在图 3.4 中，我以量化的尺度显示了含有 400 个纽扣的随机图样中，最大结节集的规模随边和结之比增加的情况。请注意，曲线呈 S 形（乙状曲线）。随着边和结之比的增加，最大结节集的规模一开始增长得很慢，然后急剧增长，再往后又复缓慢。急剧增长的一段标志着某种类乎相态转变的东西（图 3.4）。在图 3.4 所举的应用 400 个纽扣的例子中，乙状曲线在边与结之比越过了 0.5 时陡然上升。临界值 0.5 处曲线的陡峭程度取决于系统中结节的数目。系统中结节数目较小时，曲线的陡峭段较“坡”；随着系统中结节数目的增多，比如从 400 到一亿，乙状曲线的陡峭段就更加直立了。假如结节的数目增至无穷，当线绳与纽扣之比

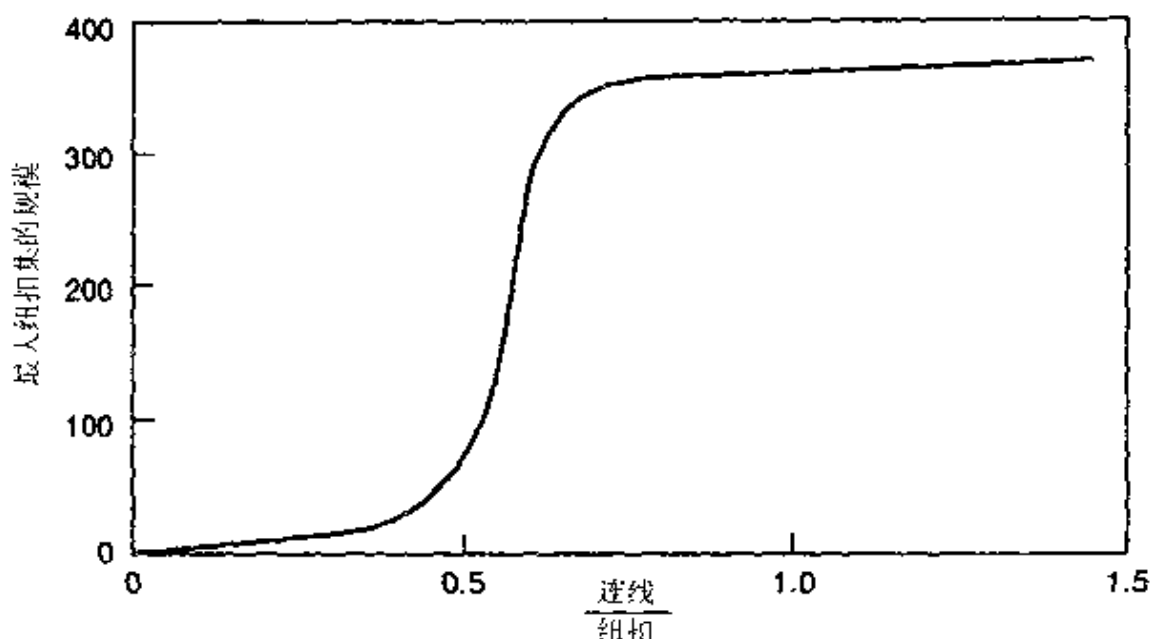


图 3.4 相态转变。在此随机图例中，纽扣间连线的比例超过了 0.5，相互联系的这些结节就会到达“相态转变”，一个巨大的网络就会结晶成形（在这个实验中，连线的数目是 0 到 600 不等，而纽扣的数量固定为 400）。

越过了 0.5 时，最大部件的规模会不连续地跃迁，从极小突然增至极大。这就是某种相态转变，很像孤立的水分子一下子结成冰块。

我希望你从这个玩具问题得到一个简单的直觉，这就是：随着线绳与纽扣之比增加，突然间那么多纽扣连接了起来，至于在系统中形成了一个巨大的纽扣网络。这个巨人部件不难理解；它的出现是随机图样的自然而可预期的品性。比拟于生命起源理论，可以说，在一个化学反应系统中，当足够数目的反应得到催化时，一个巨大的催化之网就会突然成形。实际情况表明，这样一个网络，几乎肯定是自动催化的，几乎肯定是自我维持的，活的。

反应网络

不难画出一个代谢反应图样，用圆圈代表化学物质，用方框



代表反应。为具体起见，我们先来考虑四种简单的反应。最简单的，一种基质，A，变成一种生成物，B。由于反应是可逆的，B同时也反过来变成A。这是一个一种基质、一种生成物的反应。由A出发画一黑线，画进A、B之间的方框，再从方框出发，画一黑线，画到B（图3.5）。这条线和那个方框代表A和B之间

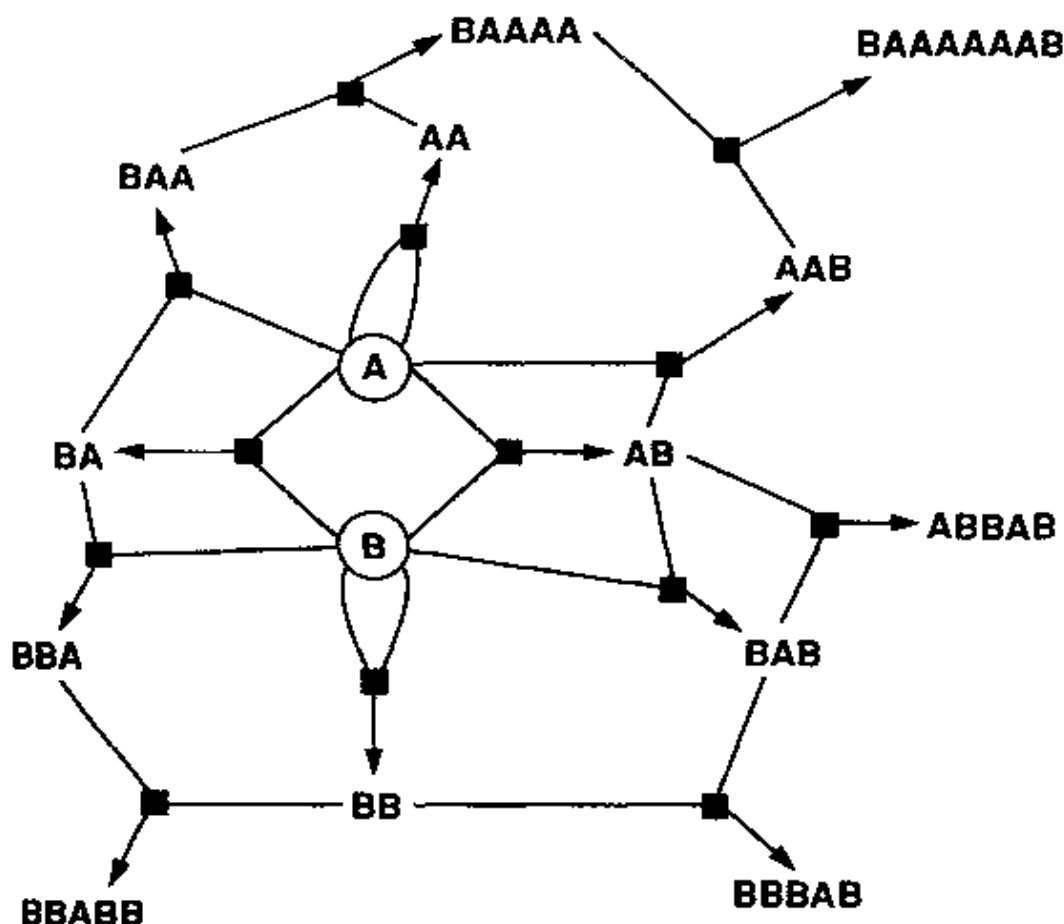


图 3.5 从纽扣及连线，到化学反应。在这个假设的化学反应网络中——我们称之为反应图——小分子(A 和 B)结合形成大分子(AA, AB, 等等), 这些分子又进一步结合形成更大的分子(BAB, BBA, BABB 等等)。同时, 这些大的分子, 也会分裂变成简单的基本分子。我们用线段将两个基本分子联系起来, 指向一个表示反应的方框, 再用箭头指向反应的结果。(由于反应是可逆的, 这里使用箭头, 是为了把基质和反应制造出的产品区别开来, 表示的是单方向的化学作用。)由于某些反应所产生的产品, 又是另一些进一步反应所需的基质, 我们就会得到一个错综复杂的反应网络。



的反应。现在，设想有两个分子，比如 A 和 B，彼此结合，或者说“捆绑在一块儿”，形成一个较大的分子 C。在逆反应中，C 被“劈开”，形成 A 和 B。我们可以用两条线代表这些反应：画两条线，分别离开 A、B，进入一个代表该反应的方框，加上一条离开那个方框进入 C 的线。最后，我们要考虑有两种基质和两种生成物的反应。一般说来，这种反应是从一个基质中打掉一丛原子，把这丛原子跟第二个基质上的一个或多个原子相结合。我们可以用两条线代表两种基质、两种反应物的反应：一双线离开两个基质，进入一个代表该反应的方框，再画两条线，离开那个方框，连接到两个生成物。现在，设想一个化学反应系统中所有可能的分子和反应。所有那些化学圆圈之间的所有线段和方框集合起来，就构成了反应图样（图 3.5）。

由于我们要理解集体地自动催化分子系统的出现，下一步就是区分自发的反应（设想它们进行得很慢）和催化的反应（设想它们进行得很快）。我们想要找出，在达成了自动催化的系统中，在何种条件下，同样的分子将作为反应的催化剂，而什么条件下又作了生成物。这有赖于一种可能性：系统里每一个分子都能够扮演双重的角色：它既能作一个反应中的组成部分或生成物，但又能作另一个反应的催化剂。这个双重身份，作组成部分和催化剂，完全是可能的，甚至还是熟悉的。据知，蛋白质和 RNA 分子就扮演着这个双重角色。一个酶叫做胰蛋白酶的，把你吃下的蛋白质劈成较小的碎片。实际上，胰蛋白酶也会把自己劈成碎片。而且，如第二章指出的，核糖酶就是能够作为酶来作用于 RNA 分子的一些 RNA 分子。大家完全熟悉，所有种类的有机分子都可以既是基质，又是反应的生成物，但它们同时又起着催化剂的作用，加速着其他反应。化学物质的双重身份原来毫无玄妙之处。

要深入讨论下去，就需要知道，哪些分子催化哪些反应。知



道了这些，我们就能够说明，某组分子能否集体地自动催化。可惜，一般说来，我们迄今还没有这一知识。虽然如此，我们还是能够推情度理地讨论下去：我们可以做一些有理有据的推详。我会考虑两种这样的理论，在我们将要考虑的众多模型中，有两个理论都能使我们多少有点武断地把一些催化剂系之于一些反应。对于这样的摆弄，你自然应该持怀疑的态度。当然有理由认为，必须真的知道是哪些分子催化哪些反应，才能有把握地说，某一组分子中含有某一组催化剂。在我的理论中，这样的怀疑占有重要的地位，它允许我引入一种推理模式，我在随后的讨论中将要依据这个模式。人们大可这样地反对我，说假如在化学反应的真实世界里，关于哪些分子催化哪些反应，化学的定律强制实行某种与我所说的略为不同的分配，那么，我的结论就不成立。对这样的意见，我的反应是这样的：如果我们能够显示，存在许许多多可供选择的“假说性”化学机制，每一种机制中，不同的分子催化着不同的反应，但无论哪一种机制中都出现成组的自我催化分子，那么，那种具体化学机制的细节如何就无关紧要了。我们就要显示，自我维持的网络的自发出现，是如此自然，如此有力，它甚至比偶然存在于地球上的某种具体的化学更为深邃；它深深地植根于数学本身。

不妨像前面所说的，画一幅含有一对分子，A 和 B 的反应图。用黑线，或曰边，把 A 和 B 跟它们之间的反应（方框）连起来。现在，再画出另一分子 C，它能够催化 A 和 B 之间的反应。画一蓝色箭形表示这一作用，让箭尾出于 C，箭头指向 AB 之间的反应框（图 3.6）。把黑线改为红线，来表示 AB 间的反应受到催化这一事实。考虑系统中的每一分子，设问有哪个或哪些反应，如果有的话，它能加以催化。对于每一种这样的催化剂，都画一蓝色箭形，箭头指向相应的反应方框，随之把相应的反应边改为红色。完成这一任务之后，那些反应边和它们所连结的化学

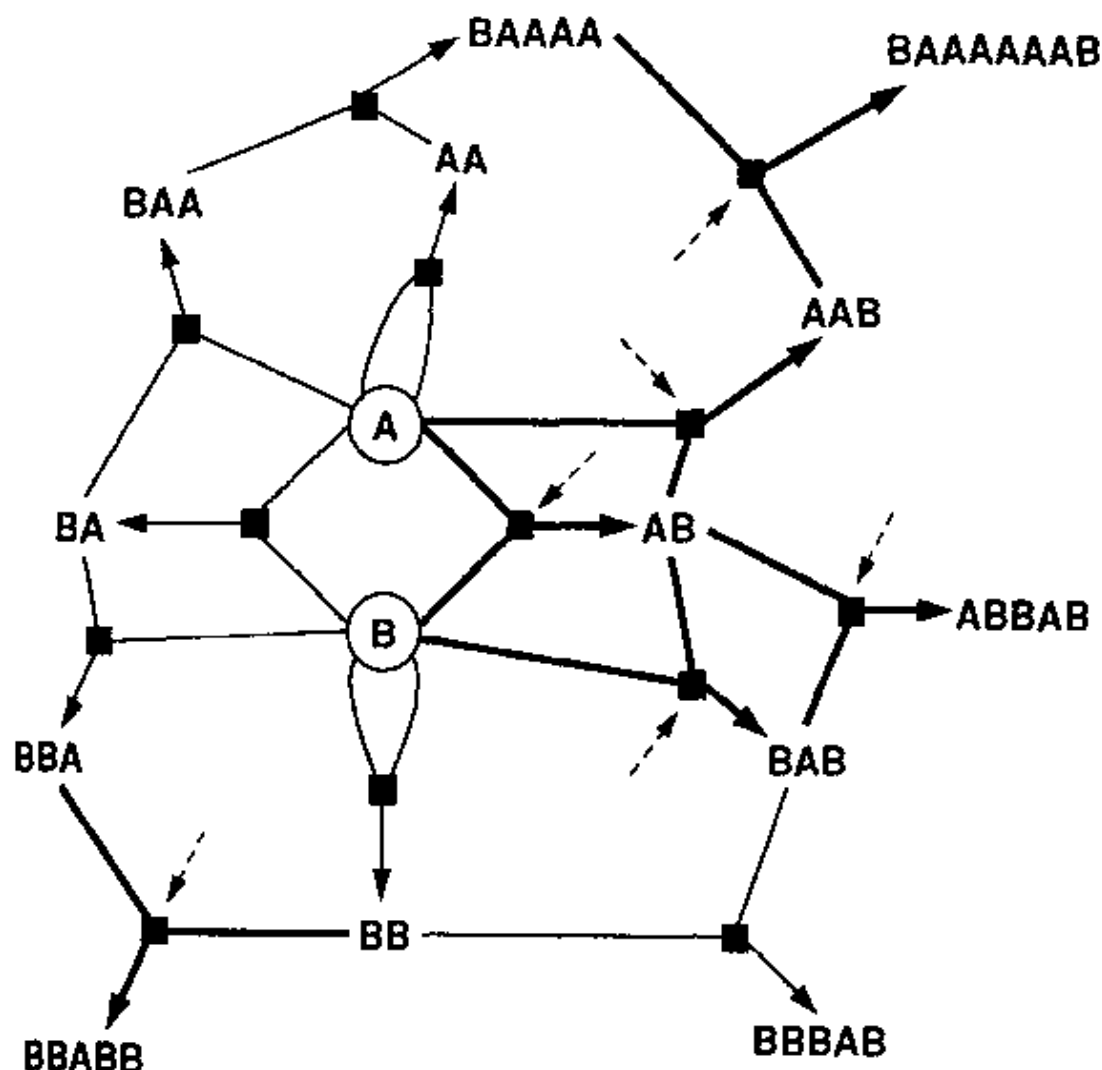


图 3.6 分子催化反应。在图 3.5 中，我们假设所有的反应都是自发产生的。而如果我们向反应中添加催化剂，加速某些反应，会产生什么效果？在这幅图当中，虚线箭头所指向的反应，就是经过催化产生的，而较粗的线段所连接的基质和产品，也受到了催化。这样我们就从整个的反应图表中，得到了一个催化反应网络子图。

结节就代表所有受到催化的反应，一总构成了整个反应图的催化反应次级图（catalyzed reaction subgraph）。蓝色箭形和它们所出发的那些化学结节就表示施加催化作用的那些分子（图 3.6）。

现在我们来考虑，这一系统要想包含一个自我催化的次系统就需要什么：首先，一组分子必须用红色的受到催化的反应连结



起来；其次，这个系统里的每一分子，都必须在蓝色箭形所表示的催化作用下形成，这一蓝色箭形要么是发自系统内的某一分子，要么是从外部加入的。将后者称为食物分子。假如这些条件得到满足，我们就得到一个分子组，它能够催化其自身的形成，创生出它所需要的所有催化剂。

中心思想

这样一个由化学反应构成的自我维持的网络在多大程度上会自然地出现呢？集体地自我催化的出现会是轻而易举呢，还是根本不可能？是要我们精心挑选所需的化学成分呢，还是不管怎么混合都成？答案是令人鼓舞的。自我催化系统的出现几乎不可避免。

我们先概括地把我们的理论包进一个榛子壳里。事情是这么发生的：我们这系统中，分子的多样性是愈见其增加了。反应对化学成分，或者说边对结的比例，也愈见其增加。换言之，反应图里，连接化学结节的线段愈来愈多。系统中的分子，自己就是一些争相成为有能力催化反应的候选者，而这些分子本身，就是靠这些反应形成的。随着反应对化学成分之比的增加，被系统内分子催化的反应的数目亦在增加。当受了催化的反应的数目增加到相当于化学结节的数目时，一个由受到催化的反应组成的巨无霸网络就形成了，并且，一个集体地自我催化的系统也突地出现。一个活的代谢系统于是成形。生命在相态转变的摇身一变中粉墨登场。

现在，就让我们打开这个榛子壳，看个究竟吧。

第一步先要显示，随着我们系统中的分子愈见其多样和复杂，反应图中反应对化学结节的比例也在增加。为什么事情正是这样，那是不难看出的。设想有一个多聚物，由四个“单聚物”



组成。我们可以想象它的原子成分是 ABBB。显然，该多聚物可能由 A 粘上 BBB 而成，或者由 AB 粘上 BB 而成，或者由 ABB 粘上 B 而成。所以说，它可能由三种方式、也就是通过三种不同的反应而生成。假如我们给这个多聚物加长一个原子，每个分子所发生的反应的数目也会增加。ABBBA 可能由 A 加上 BBBA，AB 加上 BBA，ABB 加上 BA，或者 ABBB 加上 A 而成。由于长度为 L 的多聚物一般会有 $L-1$ 个内连接键，长度为 L 的多聚物就可能以 $L-1$ 种方式由较小的多聚物构成。不过，这样的度量法只能用来说明化学家所谓的绑扎式反应，也就是由较小的断片累积成分子那样的反应。分子也可能由截断的方式形成。ABBB 可能是从 ABBBA 的右边斩去 A 而成。所以，很明显，形成分子的反应的数目，可能比分子自身的数目还要多。这意味着，在反应图中，边的数目可能多于点的数目。

系统中分子的多样性和复杂性增加了，那么，反应图里的反应对分子之比又当如何呢？经过一些简单的计算，不难说明，对于那些简单的、绑扎式的多聚物来说，随着分子长度的增加，分子的种类呈指数增加，而分子变来变去的反应的数目就增长得更快了。这一愈益增加的比率意味着，随着更复杂、更多样的分子组进入我们考虑的视野，它们中间的反应图上，分子间变来变去的路线会愈益密集。反应“线”对点的比会愈趋增加，简直成了种种可能性丛杂而生的黑压压的森林。那个化学系统变得更加丰饶，充满了一些分子变成另一些分子的反应。

直到这时，我们的烧瓶里还是一些缓慢而自发的反应。要使那个系统着起火来，产生出自我维持的自动催化网络，有些分子就得起催化的作用，使反应加快。系统是丰饶的，但尚未孕育生命。除非我们能决定，是哪些分子催化了哪些反应，否则那系统是不会孕育生命的。这样说来，我们是到了建立某种简单模型的时候了。最简单的一个——尽管简单，却能用于多样的目的——



就是假定，每一个多聚物都有一定的机会，比如有 100 万次，能作为酶来催化任何给定的反应。运用这一简单的模型，我们将要“决定”是哪些反应，如果有的话，每一多聚物能通过掷一枚脾气乖戾的硬币、在 100 万次里掷出一次正面向上来加以催化。运用这一规则，任何多聚物都将被随机地、一劳永逸地系之于那个它能够催化的反应。运用这一“随机催化”规则，我们可以把受到催化的反应“染上”红色，从催化剂画出箭形，指向每一催化剂所催化的反应，然后问我们的模范化学系统是否含有一个集体自动催化的分子组：一个分子网络，由红线连结，同时还含有那些有催化作用的分子，它们催化着自身所以形成的那些反应；这些催化作用通过蓝色箭形来表示。

还可以建立一个化学上更言之凿凿的模型。设想我们的多聚物是 RNA 串；引入模板匹配。这个模型是简单化了的。其中，Bs 通过某种沃特森 - 克里克配对法与 As 相匹配。如是，六聚物BBBBBB就可能作为一个核糖酶发生作用，连结起两个基质，BABAAA和AAABBABA，通过它们的两个相应的AAA编辑地址，并且催化两个基质的捆绑，使成为BABAAAAAABBABA。为做得在化学意义上更现实些，我们还可以要求，即令一个候选核糖酶有一个地址来匹配其基质的左右两端，它仍然只有百万分之一的机会去拥有别的化学性质，让它去催化反应。这就搞定了一个主意：在模板匹配之外，还需有别的化学特性，才能达成核糖酶的催化。且让我们称之为匹配催化规则。

由此得到一个关键的结果：不管我们运用这些“催化剂”规则中的哪一种，当该组模范分子的多样性达到某种临界值时，一个由受到催化的反应组成的“红色”巨无霸部件就将成形，同时出现一些集体自动催化的分子组。现在，不难看出，为什么这一出现实际上是不可避免的。假如我们运用随机催化规则，设想任何多聚物都有百万分之一的机会作为酶对任何给定反应发生作



用。随着模型系统中分子多样性的增加，反应对分子之比也在增加。当分子多样性达到足够的高度时，反应对多聚物之比达到了百万比一。有了这样的多样性，平均说来，每一个多聚物将会催化一个反应：百万比一乘以百万分之一等于一。当受到催化的反应与化学成分之比为 1.0 时，就会有极高的可能形成一个“红色”巨无霸部件，就是一个由受到催化的反应组成的网络——也就是一个集体自我催化的分子系统。

这便是一个关于生命起源的观点：分子多样性必需达到某个临界值，那个系统才能着火，达成催化的闭合。一个由 10 个多聚物和百万分之一催化几率组成的简单系统只不过是一组死气沉沉的分子。几乎可以肯定，10 个分子中，没有任何一个能够催化 10 个分子间的任何反应。在这盘死气沉沉的分子汤里将不会发生任何事件，只有一些非常缓慢的自发的化学反应。增加分子的种类，并增加它们的原子复杂性，它们之间就会有越来越多的反应受到系统内化学成员的催化。当分子多样性超过某一临界值时，一个由受到催化的反应组成的巨无霸网络就要作为一种相态转变而成形。受到催化的反应组成的次级反应图起先还有许多个不相连属的部件，后来产生出一个巨无霸部件，外加一些较小的、孤立的部件。现在，你凭直觉就意识到，那个巨无霸部件将会包含一个集体地自我催化的次级系统，它能够吸取食物分子，通过受催化的反应而形成自身。

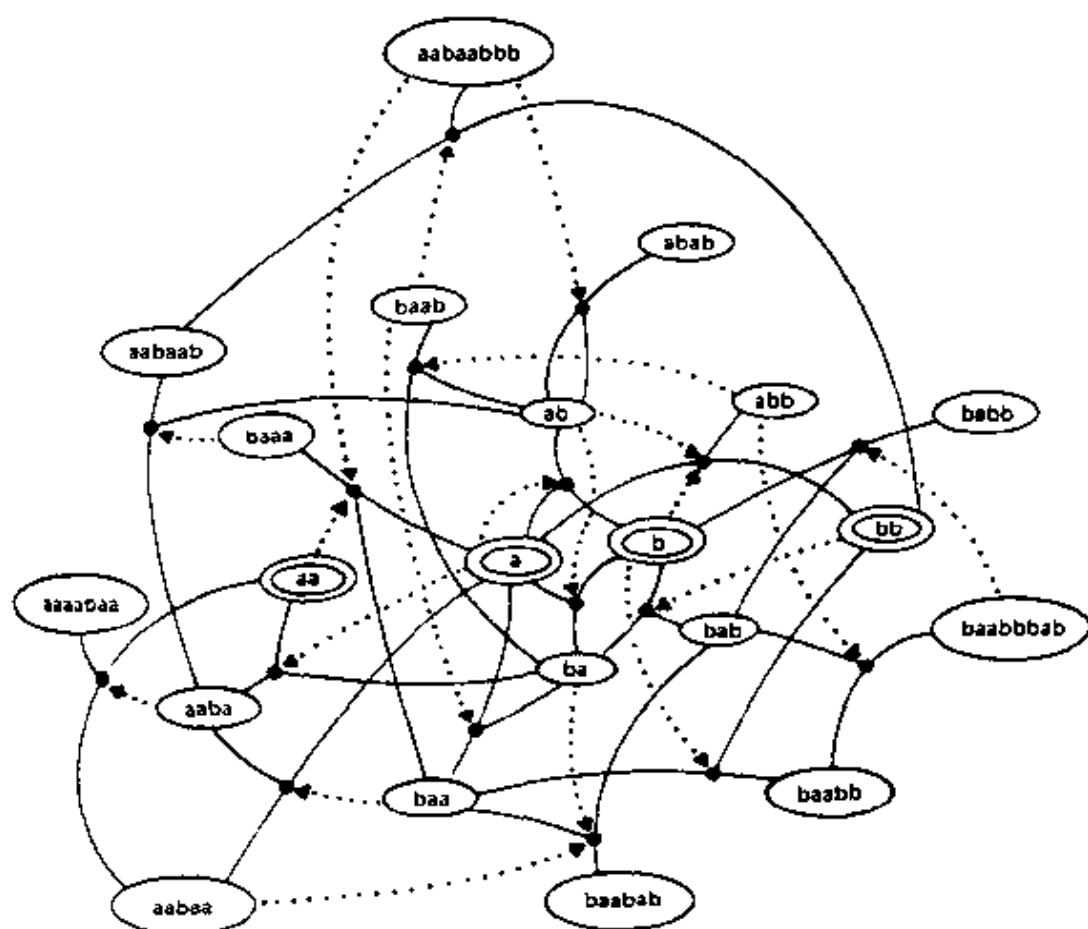
现在，我已讲了我心目中关于生命可能是怎样形成的那些个中心思想。这些思想如果不是人们所熟悉的，也是非常简单的。生命在某个分子多样性临界值上成形，其原因就是催化闭合本身的成形。我希望，这些思想将为实验所证实，成为我们关于生命起源化学说的新故事，成为我们关于自己古老渊源的新见解，成为我们关于生命发生的新感觉：你会感觉到它是这个物理世界的当然属性。



我们曾借助电脑模拟把这一过程做成影片。在那个影片里，我们可以看到，这一成形是不管怎样都会发生的：通过分子多样性原则，它会发生；通过任何分子催化任何反应的概率原则，它也会发生。我们把分子的参量和概率的参量分别称为 M (molecule, 分子) 和 P (probability 概率)。增加 M 或者增加 P ，死沉沉的汤里起初并没有多少事故发生；后来，那道汤突地活了。迄今还没有用实在的化学成分做成这一实验——我随后还要回过头来道其所以。可是在电脑上，则确有一个活的系统挨挨挤挤地涌出。图 3.7 显示一个模范的自我繁衍代谢系统看起来究竟怎样。你会看到，这个模范系统，乃是以数种简单食物分子的不断供应为基础的。那些食物分子是些单聚物 A 和 B，还有四种可能的两聚物 AA、AB、BA 和 BB。这个系统就是从这些东西形成了一个含有 21 种分子的集体地自我催化、自我维持的模范代谢系统。还有更复杂的自我催化系统，其中含有数百种甚或数千种分子部件。

如果我们运用催化的模板匹配模型，得到的结果也基本一样。可能的反应对多聚物之比如此之大，至于最终要出现一个由受到催化的反应组成的巨无霸部件和一些自动催化的分子组。不管大自然选择了哪条途径、决定由哪些化学物质催化哪些反应，总会有个分子多样性临界值，一旦达到这个数值，就会由若干个红色的、受到催化的反应越过某个相态转变，而一个巨大的化学成分之网就会从系统中成形。这个巨大网络，却原来几乎总是集体地自我催化的。

这样的系统至少是自我维持的，但是，它也非常近乎是自我繁衍的。设想我们那集体自动催化的反应系统被包容于某种舱室。某种舱室作用是至关重要的，它能防止反应中的分子被稀释。这个自动催化的系统可能构成亚历山大·奥帕林(Alexander Oparin)的 coascervates 之一，要么，它就会创造并被包容于一个



- (double circle) = 食物分子
 (single circle) = 其他化学物质
 (Y-shape) = 反应
 (dotted line) = 催化作用

图 3.7 一个自催化系统。典型的小型自催化系统，其中，充当原料的分子（a, b, aa, bb）组合建立起自足的分子网络。该网络中的反应用点来表示，并用线段将它和较大的聚合物以及分解后的产品连接起来。虚线表示的是催化作用，将催化物和受到催化作用的反应连接起来。

有双层膜的小囊里。当系统中的分子成分开始重造自身时，每一种分子的拷贝的数目就可能增加，直到总量翻一番。那时，该系统就可能分裂成两个 coascervates，也就是两个有双层膜的小囊，或者说是别的什么舱室化形式。实际上，这样的一分为二会随着



系统的容量的增大而自然地发生。如此，我们的自动催化的原初细胞现在就已经在自我繁衍了。一个自我繁衍的化学系统，用某些标准来衡量是活着的系统，就呱呱降生了。

给反应加油

读到这儿，可能有人要反对我说，在 A 串和 B 串是这般情形，在原子和分子那里却未必是这般情形。爱因斯坦说过，理论不可不简单，也不可太简单。我们的模型里迄今还缺一样东西，那就是能量。我们已经看到，活的系统是开放的、不平衡的热力学系统，维持它们的，是穿过它们的物质和能量之流。像在大为简化的别洛索夫 - 扎波廷斯基反应中一样，活的系统要靠耗散物质和能量，也就是靠吃喝拉撒，来维持其结构。

问题是这样的：创造大分子多聚物需要能量，因为热力学原理倾向于把它们分解成较小的零件。一个有化学现实性的自动催化系统必须要获得能量，才能创造并维持可作为自己催化剂的大分子。

具体一点，请设想有一个由 100 个氨基酸连接而成的蛋白质，或者是一个更小的氨基酸串儿，名为肽。通过肽键把任何两个氨基酸连接起来都需要能量。有一个简易的办法来验证这一点。那个肽键限制着相连的两个氨基酸的活动。要把两个氨基酸分开，一定需要某种拉力。所需拉力的大小取决于肽键的能量。如前所述，几乎所有的反应都是自发而可逆的。肽键的情况也不例外。在肽键形成时，一个水分子被从反应中的一对氨基酸中拉拽出来。所以水本身就是该反应的生成物。反过来，当一个肽键被断开时，需要消耗掉一个水分子。如果把肽溶解于水，水分子就倾向于打开肽键。

在通常的多水的环境里，断开的氨基酸与成对儿的氨基酸



(双肽)之比约为 10 比 1。但是,一个双肽要跟一单个氨基酸结成一个三肽,那算法也是一样。在多水的环境里,双肽和单个氨基酸与三肽之比在化学平衡时大约也是 10 比 1。请注意这件事的后果:在化学平衡时,两个氨基酸与它们所形成的双肽之比为 10 比 1,双肽加一单个氨基酸与三肽之比也是 10 比 1。这样一来,单个氨基酸与三肽之比就不是 10 比 1,而大约是 100 比 1 了。依此类推,在化学平衡时,氨基酸与四肽之比大约就是 1000 比 1。当较大多聚物分子加长时,每加长一个氨基酸,它在化学平衡时相对于氨基酸的浓度就会减少 10 倍。

上述简单计算的含义是这样的:在单个氨基酸与各种肽——最长比如说可达 25 肽——的混合物处于化学平衡时,平均来说,氨基酸的浓度与任何一种含有 25 个氨基酸的特定的肽的浓度之比大约就会是 1 比 10^{-25} 。具体来说,假如把氨基酸溶于水中,得到最高的浓度,在化学平衡时,任何长达 25 个氨基酸的特定氨基酸串将不会多于一升水里一个分子!相比之下,任一种单个氨基酸拷贝的数目都会在 10^{20} 与 10^{23} 之间。而自动催化系统用得到很大的多聚物。在上述的热力学困境中,如何得到高浓度的这样的分子呢?

克服这一巨大障碍,至少有三种基本的途径。三种途径都很简单。第一种,反应可以限制在面上而非在体上发生。这样的反应有助于形成大分子多聚物,其道理原也简单。化学反应的速率取决于各种反应模式相互撞击的速度。假如事情涉及酶,那个酶也得遭到撞击。假如反应在体上,比如说在一个烧瓶里发生,那么,每一个分子都必须在三个纬度上散开,进入各种各样的反应模式。分子在三个维度中游荡,就很容易彼此失之交臂(想一想我在第二章里描述过的漫画)。相反,假如分子被限制于一层薄薄的面,比如说一团泥巴上或一个双层的膜上,那么,分子找分子就只发生于两个维度上了。分子间要失之交臂就困难得多。为



让你有个正确的印象，请你先想象分子沿一个极细的细管子呈单维度扩散。那样，它们就必定要互相碰撞。简言之，把反应限制于面上，会大大增加基质间相互击中的机会，并由此加快形成较长多聚物的速度。

加速较长多聚物形成的第二个简单机制，是将那个系统脱水。脱水就是拿掉水分子，以此来减低断开肽键的速度。我跟我的同事多伊纳·法默(Doyne Farmer)、诺尔曼·帕卡德(Norman Packard)，后来还有理查德·贝格利(Richard Bagley)将此作了电脑模拟，在模拟反应中，我们发现强有力的证据表明，一点简单的脱水就足以使真正的自动催化的多聚物系统发生繁殖。我们的模型毫不牵强地符合化学和物理定律。

脱水不是骗人的花招。它真的管事儿。有一个出名的反应，叫做 plastein 反应的，60 年来已被透彻地研究过。胃里的胰蛋白酶有助于消化我们吃下去的蛋白质。假如把胰蛋白酶同大蛋白质在某种多水的介质里混合，它就会把蛋白质截成较小的肽。但是，假如反应系统被脱了水，减低了水对肽的相对浓度，平衡就会朝较小的肽片段合成较大多聚物的方向偏斜。这时，胰蛋白酶有助于催化这些绑扎式反应，产生出较大的多聚物。如果把这些较大的多聚物拿走，将系统进一步脱水，胰蛋白酶就会有助于合成更多的大多聚物。

面上的反应和脱水可用来帮助大分子多聚物的形成。然而，现代细胞也在运用一种更为灵活、更为高段的机制。细胞在形成化学键时得到了它们所需要的能量，因为这同时也打开了无所不在的帮忙分子中的高能量化学键。三磷酸腺苷(ATP)就是这些帮忙分子中最为常见的一员。需要能量的反应叫做吸热反应；释放能量的反应叫做放热反应。细胞驱动吸热反应，其方式是把它同放热反应相联系。

已有人提出一些可信的含有高能量化学键的候选者，认为它



们可能为早期的自我繁衍的代谢系统提供了能量。比如，焦磷酸酯，也就是两个磷酸酯连在一块儿，是很丰饶的，它在断开时会释放出相当大的能量。焦磷酸酯可能被用作不花钱的能源，驱动了早期活系统中的合成反应。法默和贝格利已用电脑模拟显示，由这些化学键提供能量的模型系统符合可信的热力学标准，还能繁殖。

要把放热反应和吸热反应联系起来，需要什么呢？难道除了催化闭合的达成之外，又有什么神秘东西跟我们作对吗？我想没有。这是个问题，但很难说它神秘。说到底，所要求的无非是，那个自动催化的系统要包含一些把放热反应跟吸热反应联系起来的催化剂，以便让一种反应为另一种反应提供能量。吸热的大分子合成必须跟高能量化学键的消解结成对子，那些高能量键由食物分子提供，或者最终由阳光提供。但这一点不像是什么不可逾越的障碍。催化这些成对儿的反应，跟其他反应并无质的不同：需要一个酶来笼和住那个转型状态。无非是需要足够的分子多样性，仅此而已。

一种顽固不化的总体论

这种关于生命起源的理论植根于一种顽固不化的总体论，它不是来自神秘主义，而是来自数学的必然。生命的成形，需要某种分子多样性的临界值。简单的系统就是不能达成催化闭合。生命是总体地、而不是零碎地出现的。从开初到现在一直是这样。这样，它就不像那个占统治地位的光屁股 RNA 生命起源说，不像它那样有一套“就是这样”的故事。我们这儿总还有希望能够解释，何以活的生物似乎有某种最低限度的复杂性，何以比 *pleuromona* 更简单的东西就不能活。

如果此说是对的，那么，我们应能证明它。我们应能在虚构



的试管里重新创造出生命来，好像那些被浮士德之梦所驱使的科学家们那样。我们是否有望创造出一种新的生命形式？我们能否让上帝颜面无光？我想我们能。况且，上帝那么风度，那么朴实，他应该欢迎我们为找到他的律条而奋斗。科学的方式才真正是玄秘的。我们在第七章就会看到，创造集体自我催化的分子系统的希望，是跟以后会成为生物技术第二领域的工作相联系的，这个领域将会产生新的药剂，新的疫苗，新的医学奇迹。并且，关于集体自我催化的分子体系之催化闭合的概念，看起来将会像是复杂性原理的一种深层特性，将会在我们研究生态系统、经济形态和文化系统时一再浮出水面。

伊曼纽尔·康德(Immanuel Kant)早在两个多世纪前就曾写道，生物是整体的。整体依赖部分而存在；部分既因整体的维持而存在，又为整体的维持而存在。这一全体论品质曾经被视为一种自然的生物学作用，可曾几何时又被人们从生物学那儿剥夺了。取而代之的，是基因组的形象：它成了调度分子舞会的总指挥。可是，一组自动催化的分子大约是人们可能从康德的全体论推想出的最简单的画面了。催化闭合保证，整体的存在依赖于部分，而部分的存在，既因了整体的维持，又为了整体的维持。假如生命真的开始于集体地自动催化的分子组，这些分子组便值得我们敬若神明，因为整个生物圈的繁荣即建筑在它们释放于全地球的创造力之上。我们应有的，是敬奉，是惊奇，而不是神秘主义。

最要紧的是，如果真是这样，那么，生命发生的可能性就比我们从前设想的要大得多。宇宙不但是我们的家。我们更可能还要跟许许多多未知的伙伴分享这个家。



第四章

免费的秩序

生命的世界有幸被赐予丰厚的秩序。每一个细菌都协调着几千种蛋白质和其他分子的合成与分配。你身体里的每一个细胞都协调着大约 10 万个基因以及它们制造出来的酶和其他蛋白质的活动。每一个受精卵都通过一系列的步骤展开，成为一个羽翼丰满的整体，这个整体被十分恰当地称为有机体。如果这一秩序的惟一来源是雅克·莫诺所谓的“撞大运”，也就是说，它是一个接一个幸运事故和选择结出的果子，那么，我们实在就是不可思议的了。我们从天上给贬落凡间——先是天体机械论里出了哥白尼和牛顿，后来生物学里又出了个达尔文，再后来又出了卡诺（Carnot）和热力学第二定律——只落得在一个单调乏味的星系的边缘上的一个寻常的星体周围转个不停，不可思议地作为生命形式出现在尘世间。

假如不是这样，假如生命是在分子足够多样的某种混合物中几乎不可避免地自发成形的，是物质和能量的品性使然，那么，人类的地位又当如何呢？我们已经找到了一些蛛丝马迹，说明这个宇宙原来是我们自己的天然的家園。

这个关于自发秩序的故事，我们还是刚刚讲了个开头呢。我希望给你显示，在生命世界的创造中，自发秩序像自然选择一样出了大力。我们是有双亲的孩子，而不是只有单亲的孩子。我们



迄今已经显示，自动催化的分子系统何以会从某种多样性的化学汤中自发突现。我们已经看到，集体的自动催化，还有生命本身，都是由于我称之为“免费秩序”的自组织的缘故自然出现的。虽说如此，我还是相信，这个免费的秩序，不仅支撑着生命本身的起源，同样也支撑着进化着的生物体内的秩序，甚至也支撑着生物体的进化能力本身。

如果生命是从某种翻腾不已的化学汤中自然出现的集体自动催化系统，那么，我们的历史只能从那儿写起。最好不要突然失掉进化的能力。达尔文教导我们，进化的关键动力，需要有自我繁衍和遗传变异。一旦形成了这些东西，自然选择就会动手选出那些较适于生存的，删汰那些不太适于生存的。大多数生物学家认为，DNA 或 RNA 是某种稳定的遗传信息库，对于适应性进化来说是至关重要的。可是，假如生命发源于集体的自动催化，后来才学会了结成 DNA 和遗传密码，我们就不得不作出解释，说明这样的自动催化的系统何以能够历经遗传变异和自然选择而仍旧抱持一个基因组。假如我们需要模板复制的奇迹和蛋白质遗传编码那一更神的奇迹，那就又要落入鸡生蛋蛋生鸡的问题，让我们想起来头大。进化是离不开这些机制，而如果没有进化来把它们敲打成个儿，我们也不能够有这些机制。要继续寻找一个理论以说明我们是注定要来的，我们就要问这么一个问题：有没有一种途径，让自动催化系统能够不靠基因组那套复杂玩意儿而进化？

我的同事，理查德·贝格利和多伊纳·法默曾经暗示过这种事是如何发生的。我们已经在第三章里看到，一个自动催化的系统一旦闭合在某种空间小室里，比如说，一个 coascervate 或是一个有双层膜的泡囊里，那个自我维持的代谢系统实际上就能增加系统中每一种分子的拷贝数目。从原则上讲，当某种拷贝的总量翻一番的时候，那个成间隔的系统就能“分裂”成两个子系统。



自我繁衍于是发生。我前面说过，在实验中，这样的成间隔的系统，在其体积增大时，的确倾向于自发地分裂成两个子系统。可是，假如子“细胞”，也就是小室，总是完全等同于母“细胞”，那就不会有遗传变异发生了。

理查德和多伊纳发现了一个自然的途径，通过那一途径，变异和进化能够在这些系统中发生。（这一发现是理查德博士论文的一部分。他是在圣迭戈的加利福尼亚大学读博士的时候做出这一发现的。斯坦利·米勒(Stanley Miller)是他的主考官之一。）他们两人提出，一个自动催化的反应网络自顾自做着它的事情，而这时候，某个随机的、未经催化的反应偶或发生。这些自发的波动，倾向于产生出一些本不是系统内成员的分子来。可以认为，这些新的分子是某种分子种类的半影，是某种围绕自动催化系统的化学迷雾。通过吸纳这些新的分子种类进入自身，系统就会有所改变。假如一个新的分子有助于催化它自身的形成，它就会成为网络中的正式成员。那时就会有新的回路加到代谢网络上。要么，假如那些闯入者分子阻碍了从前已有的反应，那么，一个旧有的回路就要从网络中被消除掉。不管出现哪种情况，遗传变异显然是可能发生的。假如结果是一个更加有效的网络——能够在恶劣的环境中更好地维持自身——那么，这些突变就会得到奖励，改变了的网络就会胜出那些较弱的竞争对手。

简言之，有理由相信，自动催化的系统能够进化而无需一个基因组。这种进化不是我们惯于想到的那种。这里并没有单独存在的像是 DNA 的结构携带着遗传信息。生物学家把细胞和生物体分为遗传型（遗传基因）和显形（酶和其他蛋白质，还有作为生物体部件的器官和形态发生）。在自动催化这儿，并没有遗传型和显型之分。系统作着自身的基因组。尽管没有基因组，但那种并合新种分子的能力，还有可能是消除旧有分子形式的能力，就决定了它能够产生一群自我繁衍的化学网络，这些网络各有自



己的性格。达尔文告诉我们，这样的系统会因自然选择而进化。

实际上，这种自我繁衍的、分成间隔的原生细胞及其子细胞将会无可避免地形成一个复杂的生态系统。每一个原生细胞都会繁衍，并在繁衍中产生出遗传变异；此外，每一个细胞都倾向于有选择地从环境中吸纳新种的分子而淘汰旧有的分子，像现代的细菌所做的一样。简言之，一个原生细胞生出的分子可以被运送到另外的原生细胞。那个分子可能促进第二个原生细胞的反应，也可能毒害它的反应。我们说过，代谢着的生命一开始就是完整而复杂的；不仅如此，所有的互利共生和相互竞争作用——我们称之为生态系统——都是一开始就完整地、全装冠带一下子登场的。这一关于所有大大小小的生态系统的故事，不只是关于进化的，而是关于共同进化的。我们 40 亿年来一直在共同创造着我们的世界。包含分子和生物体的共同进化的免费秩序的故事还在继续。随后的几章就要展开这一故事。

可是，进化所需的，不仅仅是变迁的能力和耐受遗传变异的能力。要演义达尔文式的传奇，一个活的系统首先必须能够在适应性和稳定性之间达成内部的妥协。要在一个变化无常的环境中存活下来，它无疑必须是稳定的；可是，稳定也不能稳定到老是死水一潭。也不能不稳定到摇摇欲坠，一点点内部的化学波动就会引起整个结构一下子坍塌。我们只需再考虑一下现已并不陌生的决定论的混沌说，以便更好地理解这一问题。还记得那只有名的里约蝴蝶吗？说它那有力的翅膀一忽扇，甚至无精打采地抖一抖，就能改变芝加哥的天气。在混沌的系统里，初始条件的微小变化，都能够导致深刻的紊乱。从我们迄今为止的讨论看来，并没有理由相信，我们的自动催化系统会那么过敏，那么混乱无序，从一开始就注定小命儿不长；并没有理由认为，因内部代谢吸纳了毗邻的细胞而发生的某些分子浓度的小小变化会放大其作用，放大得如此有力，至于会使整个的网络一霎时灰飞烟灭。我



在此设想的那些自动催化系统必须能协调数千个分子的行为。考虑到这样复杂的系统怎么会在混沌的律条下滋生繁衍，那会让你的思想畏缩不前。

出现混沌状态的潜在可能不纯是理论上的。别的分子可能跟我们细胞里的酶相键接，阻碍或加速它们的活动。酶可能被反应网络中的其他分子“打开”或“关闭”。现已周知，在大多数细胞中，这样的分子反馈可能会引起复杂的时间和空间上的化学振动。混沌的潜在是现实的。

假如我们要相信，生命开始的时候，分子是自发地聚集起来，形成自动催化的代谢系统的，那我们还需要为分子的秩序找到来源，那将是一个带根本性的内部自我平衡，它会使细胞有能力作出缓冲，不随便动摇混乱；那将是一种妥协，会允许原生细胞的网络经得住些小的波动而不致坍塌。然而，没有基因组，这样的秩序从何而来呢？答曰：这个秩序必须来自那个网络的某种集体能动性，必须是那些成对儿的分子的协调行为。那将是免费秩序的又一案例。我们就会看到，有一些极其简单的法则或约束力，足以保证意想不到的、深刻而有力的秩序会自动发生。

自我平衡的源泉

请允许我动用简单而非常有用的理想化。让我们设想，每一种酶都只有两种状态：打开或关闭，并且能够开关自如。于是，在特定时刻，每一个酶要么是活跃的，要么是不活跃的。这种理想化像所有的理想化一样，也是不真实的。在现实中，酶显示出不同等次的催化活跃性。往最简单地说，反应的速度，取决于酶和基质的浓度。尽管如此，酶的抑制或是活化作用，通过分子键接酶的地址的不同，或是以其他方式改变酶，还是常见的，并且常常会引起酶的活动的剧烈改变。此外，请允许我设想，反应中



的基质和生成物各有两种状态：有或无。这个，按理说也是不真实的。在复杂的反应网络中，基质和生成物的浓度是瞬息万变。然而，“开关”和“有无”等理想化非常地有用，因为我们要考虑的系统非常的复杂，那将是带有成千种酶、基质和生成物的反应网络。

科学研究中使用理想化的理由是，它有助于捕捉到问题的要害。在使用理想化之后，你得显示，这样捕捉到的要点并不因除去理想化而有所改变。在物理学中，对于气体定律的分析，是基于关于气体分子是坚实而有弹性的小球的一些模型；这种理想化捕捉到了一些主要特征，这些特征对于建立统计力学是必需的。在第三章里，我们也曾提出一些模型，把分子及其反应比作纽扣和线绳。现在，让我们改变这一比喻，试想把一个由酶、基质和生成物构成的代谢网络，比作一个由电灯泡、连接它们的导线和电路组成的网络。一个分子催化了另一个分子的形成，我们就把它看作是一个灯泡打开了另一个灯泡。可是，分子还可能抑制彼此的形成。那就把这种情况看作是一个灯泡关上了另一个灯泡。

要使这样一个网络有条不紊地行为，有一个途径，那就是把它设计得非常精细。可是，我们早已指出，自动催化的代谢体系是从原初水里自动生成的，是从周围碰巧存在的东西中随机凑合的。人们禁不住要想，这样一种有上千种分子的偶然的混合物，行为起来十有八九会纷乱如麻而极不稳定的。实际情况却正好相反：秩序自发地生出来：是免费的秩序。再回到我们的比喻上来。尽管我们的灯泡是随机地连到一起的，可是，它们并不是非得随机地开开关关，像一片圣诞树那万点灯火一样疯狂闪烁。假以恰当的条件，它们就会规规矩矩，形成连贯而反复的花样。

要看看为什么秩序是自发地出现的，我还得引入某些数学概念，借以思考动态的系统。如果把我们的自动催化的系统看作是一个电力网络，那么，它就可能呈现千变万化的状态。有可能所



有的灯泡一齐关闭，也可能所有的灯泡一齐打开；在这两极的中间，可能存在无穷的组合。设想有一个网络，其中有 100 个结节，每一个都可能呈两种状态，非开即关。可能的组合数目将会是 2^{100} 。我们的自动催化代谢系统，大概有 1000 个分子，组合的可能性就更大发了：那将是 2^{1000} 。这个行为可能性的范围称作状态空间。我们可以将其视为一个数学的宇宙，其中，系统可以自由地漂移。

要把这些想法具体化，可设想一个简单的网络，只有 3 个灯泡组成：灯泡 1、2、3。每一个灯泡都接受另外两个灯泡的“指令”（图 4.1a）。图中的箭形，表示信号的流向。这样，如果箭形由灯泡 2 和灯泡 3 指向灯泡 1，那就意味着灯泡 1 接受着来自灯泡 2 和灯泡 3 的指令。

除了标示出线路图之外，我们还需要知道，每一个灯泡是怎样对它接受的信号作出反应的。既然每一个灯泡都只能有两种值，非开即关，我们可以将其标示为 1 和 0。不难看出，一个灯泡可能从相邻的两个灯泡那里得到四种指令样式。可能两个灯泡都不亮（00）；可能其中有一个亮起（01 或 10）；还可能，两个灯泡都亮（11）。运用这一信息，我们就可以建构一个定律表，详细标明每一个灯泡面对这四种信号会是活跃的（1）还是不活跃的（0）。比如，灯泡 1 会在只有刚刚接收到的两个指令都是活性的时候亮起。用布尔代数的语言来说（得名于 19 世纪数学家乔治·布尔 (George Bode)，数学逻辑的发明者），灯泡 1 是出于与作用：需灯泡 2 与灯泡 3 先亮而 1 后亮。我们也可以要我们的灯泡受制于布尔的或作用：灯泡 1 会在灯泡 2 或灯泡 3 亮起之后而亮。

这样的规定，我将称之为布尔网络。要完成这一网络，我将要赋予每一个灯泡一个可能的布尔作用。比如说，我要给灯泡 1 一个与作用，而给灯泡 2 和灯泡 3 或作用（图 4.1a）。钟表每滴

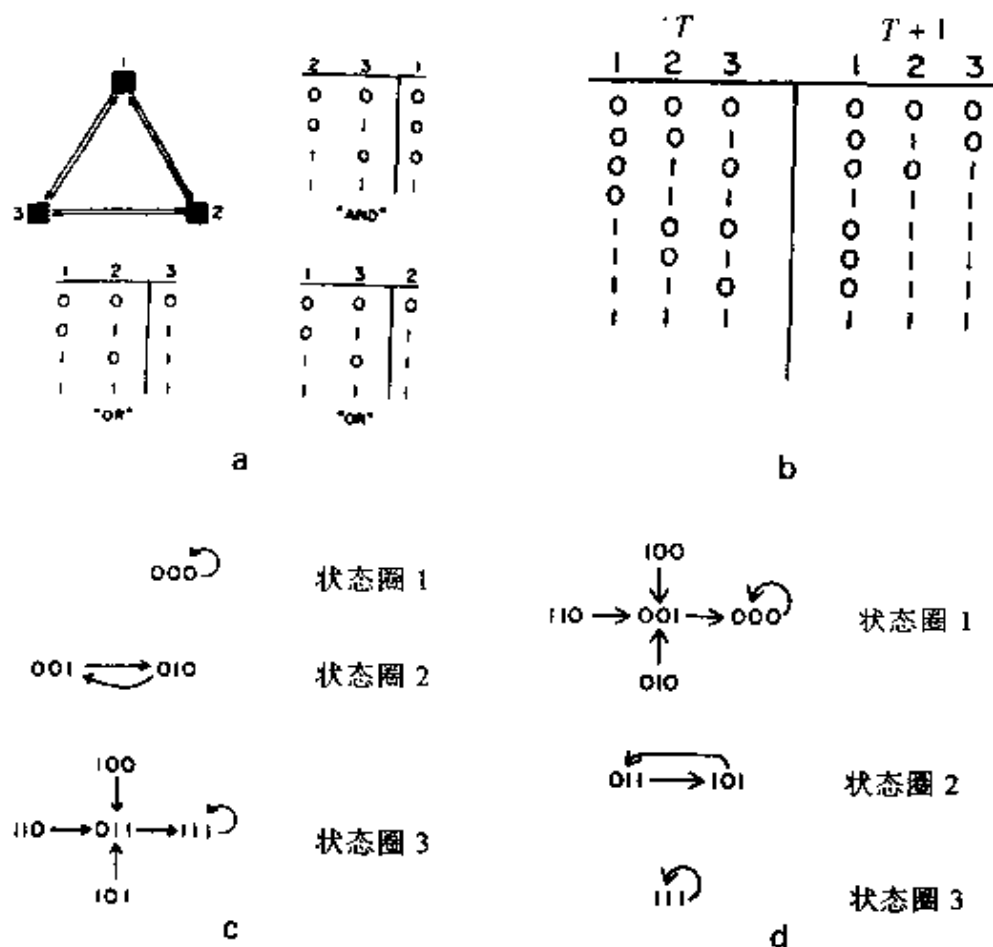


图 4.1 布尔网络。a. 具有 3 个二进制单位的布尔网络连线图, 每个单位同时又是另外两个的输入值。b. 在 T 时间内, 对于所有的 $(2^3) = 8$ 个状态, 重写 a. 所需的布尔运算规则, 每个单位下一时刻 ($T+1$) 的动作。从左向右, 该图显示出了每个状态的后续状态。c. 自动的 a 和 b 的布尔网络相态转变图, 或者称之为“行为域”, 箭头表示状态转变关系。d. 对元素 2 应用“与”运算而不是“或”运算, 所产生的变异。

嗒一声, 每一个灯泡都要看另外两个灯泡的两种眼色行事, 要么采取状态 1, 要么采取状态 0, 这些都是由布尔表规定的。结果是, 随着样式一种接一种地展开, 灯泡的闪烁就会呈现万花筒似的丰富样式。

图 4.1b 显示那个网络可能呈取的八种状态, 从 (000) 到 (111)。沿直行往下读, 图 4.1b 的右一半列出的是每一灯泡受布尔定律制约的情况。可是, 从左往右读, 图 4.1b 显示的就是



在时间 T ，每一当前状态在下一瞬间 $T+1$ 将会呈现的状态，那时候，所有的灯泡都会不约而同地采取各自的新行动，1 或 0。

现在，我们就开始理解这个小小网络的行为了。我们会看到，这个系统可以处于一定数量的状态，在这里是 8 种。假如从某个状态开始启动，随着时间的推移，系统就会沿一系列的状态依次流过。这一序列称为轨迹（图 4.1c）。由于状态的数目是有限的，所以，系统迟早会遭遇一个它已经遇到过的状态。那时候，轨迹就会重现。由于这个系统是确定性的，它将围绕一个反复出现的状态之圈回环不已。这种回环称为状态圈。

依我们的网络——一组灯泡开开关关的样式——启动时的初始状态的不同，这网络就依循不同的轨迹，最终在某一点上落入一个循环不已的状态圈（图 4.1c）。假如网络马上落入只包含 1 和 0 的单层样式，系统就呈现最最简单的行为。这样启动的系统永远不会改变；我们就说，它胶着于长度为 1 的圈里了。可以想见，状态圈的长度就是一个状态空间中的状态总数。落入这样一个圈子的系统将会一个又一个地重复它所能呈现的每一花样。对于我们的三灯泡系统来说，结果就是它会在依次通过 8 种状态时恒定地闪烁。由于状态数很少，我们不久就会发现它闪烁的规律。现在设想一个大一些的网络，有 1000 个灯泡，因而就有 2^{1000} 个可能的状态。如果这个网络正在一个状态圈里回环，依次通过超天文数字种状态的每一种，并且，如果它通过每一个状态转变哪怕仅用百万兆分之一秒，那我们一辈子也甭想看到这个系统完成它的轨迹。

所以嘛，布尔网络中令人欣赏的第一件事是：任何这样的网络都会稳定下来，进入一个状态圈。这个状态圈可能很小，是个单层恒定状态，也可能很大，状态数目大到数目失去了意义。假如一个系统落入一个较小的状态圈，它将呈现井井有条的行为。可是，假如状态圈太大，系统的行为将是本质上不可预测的。仅



仅有着寥寥数千个分子的网络，它可以漫游的状态空间就不是常人所能想象的了。要我们那些自动催化的系统井井有条，必须不₁让它沿着没完没了的切线飞掠而去，而要它安顿下来，进入较小的状态圈，也就是说，行为稳定，节目单有限。

要深入理解自动催化的系统有多大的可能会稳定到能够安身立命，我们还必须讯问如下的问题：怎样能做成状态圈短小的井井有条的网络？微小的状态圈难做吗？如果小圈子难做，那就意味着，稳定的自动催化的代谢系统的出现是个奇迹。或者，难道它是自然而然地发生的？难道它是免费秩序的一部分？

要回答这些问题，我们就需要对吸引子的概念有所理解。能流入同一个状态圈的不止一个轨迹。在任何不同样式下启动一个网络，当它翻腾过一系列状态之后，它都会安顿到同一个状态圈里，按同样的规律闪烁。用能动系统的语言来说，这个状态圈就是一个吸引子，而流入其中的那组轨迹则称为吸引区。我们可以大略地把一个吸引子想象为一个湖，而把吸引区想象为流入湖中的水系。

一个多山的地区可能有许多个湖泊，同样，一个布尔网络也可能蕴含许多种状态圈，每一个都吸纳着自己的众流。图 4.1a~c 所示的小小网络就有三个状态圈。第一个状态圈有一个单层的稳定状态 (000)，它没有吸纳任何轨迹。那是一个孤立的稳定态。达到这个状态并不难，怎么启动它都成。第二个状态圈有两种状态，(001) 和 (010)。网络就在两种状态间来回振荡。没有其他的状态流入这个吸引子。在任一种状态下启动网络，它都不会冲出圈子，而要在两种状态之间反复闪烁。第三个状态圈包含一个稳定状态 (111)。这个吸引子位于一个吸引区内，吸纳着四种其他状态。不管在四种样式的哪一种之下启动系统，它都会很快地堕入稳态，胶结在那儿，三个灯泡都开亮。

在适宜的条件下，这些吸引子可能成为较大能动系统中的秩



序之源。由于该系统终归要循着轨迹流入吸引子，所以，微小的吸引子会把系统“诱捕”到状态空间中的小小的亚吸引区。在一片可能行为的汪洋大海中，系统安顿下来，在有限的几个行为上规行矩步。吸引子可能不大，却造出了秩序。的确，微小的吸引子乃是我们正在寻找的免费秩序的先决条件。

可是，光有微小的吸引子还不够。一个能动的系统，比如一个自动催化的网络，要能够井井有条，它必须表现出自我平衡，就是说，它必须能抵御小小的混乱。吸引子也是自我平衡的最终来源。有了自我平衡，一个系统就能确保稳定。在较大的网络里，任一状态圈一般都会吸纳一片广袤的吸引区；许多状态流入吸引了。另外，那片吸引区中的各种状态可能很像它们所流入的那个状态圈里的那些状态。为什么这件事那么重要呢？设想我们任选一个灯泡，并把它打到相反的状态。所有或大多数这样的混乱都会使那个系统离开同一吸引区。所以，系统最终将回到自己受扰乱而离开的同一个状态圈里！这乃是自我平衡稳态的要害所在。图 4.1c 中的状态圈 4 就是以这样的方式保持稳定的；假如网络在此吸引区里，改变任一灯泡的活动都不会对其行为发生长期的影响，因为系统终将回到同一个状态圈内。

然而，自我平衡的稳态并不是每时每刻都能发生，相反，状态圈 1 就是一个孤立的稳定状态，经不起最最轻微的扰乱。一经这样的扰乱，系统就会被推入一个不同的吸引区，再也回不了家。假如网络有这样的性质，就是说所有的吸引子都这样的不稳定，那么，我们就可以想象，轻微的混乱（蝴蝶翅膀的一忽扇）都会持久地把该系统撞出吸引子，使它飞掠而去，登上状态空间中永不重复的无尽旅程。那个系统就将是混沌无序的。

如果我们要相信，生命始于自动催化网络的自发出现，那我们最好还是希望，这些网络是自我平衡的。然而，某些类型的较大网络会自然而然地表现出自我平衡吗？难道，自我平衡很难造



成，因而稳定网络的出现希望甚微吗？要么，它也是免费秩序的一部分？

我们的确需要一些规律，来描绘是哪些种类的网络可能有序，而哪些种类的网络又可能堕入混沌。任何布尔网络都有吸引子，而每一个吸引子都吸纳某种吸引区。可是，那些有着数千种分子的网络的状态空间实在是超天文数字的。假如我们换用另一个比方，把每一个状态圈看作太空中的一个星系，那么，到底有多少作为吸引子的星系漫过兆兆秒差距^①大的网络状态空间？有着无数的状态在状态空间中，你可能拥有成亿兆的吸引子。如果有成亿兆的吸引子，那么，那个系统就可能位于其中的任一个上。这听起来不像是有序。

可以认为，集体地自动催化的系统能够进化；而现代的生物的确在通过突变而进化。这样的突变能永久地改变系统内各类分子间的职能关系。这种因突变而造成的永久性改变会不会使一个自动催化的系统坍塌，让它在自己的分子空间中混沌地闪烁，毒化它催化自我繁衍的能力呢？微小的突变通常会不会引起大灾变？用布尔网络的语言来说，扰乱一个网路的另一途径就是永久地“突变”其线路图，改变其输入指令或制约灯泡开关的布尔作用。在图 4.1d 中，我已经显示过改变制约灯泡 2 的规律，即把它从或作用改成与作用会造成的结果。你也能看到，这使得系统呈现一个新的动态形式。一些状态圈还在，另一些状态却改变了。新的吸引区会把网路导向不同的样式。

达尔文曾经设想，活的系统会由于一些引起生物体性状微小修改的突变而进化。这些能够作些微改变的可人性质不容易得到吗？要么，它也是免费秩序的一部分？纯粹的达尔文主义者会争辩说，这种可人的稳定性只有在做了一系列进化实验之后才能出现，可是，这又是一个循环论证。我们正试图解释进化能力本身的起源呢！不管生命是怎样开始的，不管是有光身子的能复制的



RNA 分子，还是有能集体催化的系统，反正这种稳定性不会是从自然选择从外部强加的。它必定是从内里生发出来的，是进化本身的条件之一。

我相信，我们所需的这些性质，我们所需的这些秩序，全都是自发地产生的。下一步，我们必须显示，免费的秩序是怎样提供了我们所需的小而有序的吸引子的。免费的秩序，极其自然的秩序，假如从前大部分不为人知，那么现在就将改变我们的生命观了。

秩序的必备条件

我们已经看到，布尔网络能够表现出深刻的秩序，但是，布尔网络也能表现出深度的混沌。所以我们就要寻求，在怎样的条件下，井井有条的动态能够生发于这样的系统。现在，我就要出示我大约 30 年的研究成果。

主要的研究成果可以简括如下：建构网络的方式有两个特征，这两个特征的不同，可以决定一个网络将处于一个有序的体制，还是处于一个混沌的体制，抑或是处于两者之间的转型态，可以说处于“混沌的边缘”。特征之一很简单，就是有多少“指令”控制着任一灯泡。如果一个灯泡只为另外的一个或两个灯泡所控制，如果该网络“交游零落”，那么，系统就表现极好的秩序。如果每一个灯泡都受制于许多别的灯泡，系统就是混沌的。所以，“调节”一个系统的连通性，也就调节了有序无序的程度。控制有序或混沌之出现的第二个特征也很简单，就是控制规律本身的偏向。有些控制规律，比如我们所说的布尔作用，与作用和或作用，就倾向于产生有序的动态。其他控制规律则产生混沌。

我和其他人进行这一研究的方式是相当简捷的。要问是怎样



的灯泡网络会表现出有序，怎样的灯泡网络又会表现出混沌，一个路子就是建构非常明确的网络并加以研究。但这会让我们陷于大量的具体网络的研究之中——又是个大到失去意义的超天文数字。我的路子是询问，某些总类的网络会表现出有序还是表现出混沌。要回答这一问题，自然就要小心地定义所要探讨的网络的“种类”，然后从库存中随机抽出大量网络用电脑加以模拟。再然后，我们可以像民意测验专家那样，建构起一个画面，来显示该种类中某些成员的典型或类属的行为。

比如，我们可以研究那些有 1000 个灯泡（我们称之为变量 N ）和每一灯泡接受 20 个指令（变量 K ）的网络。设 $N=1000$ ， $K=20$ ，据此可以建造一些巨大的网络集合。对这一集合做实验，随机抽出这 1000 个灯泡的每一个、20 种指令的每一种，同样是随机地给予一种可能的布尔作用。然后，我们就可以研究网络的行为，计数吸引子的数目，计量吸引子的长度，评估吸引子抵抗干扰和突变的稳定性，等等，等等。一个集合一个集合地试验，然后建构起关于一族布尔网络的画面，再然后，改变 N 和 K 的值，建构起另一个画面。

如此试验了多年，各种参量的网络就像老朋友一样熟悉了。看看那些其中每一灯泡只接受另外一个灯泡的指令的那些网络。在这些 $K=1$ 的网络中，没有很有趣的事情发生。它们很快落入非常短小的状态圈里，短得常常只有一种状态，只有亮与不亮一个样式。启动这样一个 $K=1$ 的网络，它马上胶结住，干巴巴翻来覆去说一句同样的话。

在标尺的另一头，看一些 $K=N$ 的网络，就是说，每一只灯泡都接受所有灯泡、包括它自己的指令。你很快就发现，网络的状态圈的长度等于状态数的平方根。想想这事的含义吧。一个网络，若只有 200 个二进制变体，就是说有 200 个或开或关的灯泡，它就有 2^{200} 或 10^{60} 种可能的状态。它的状态圈的长度等次就



是 10^{30} 种状态。在任一样式下启动网络，也就是随它哪一些灯泡是开还是关，是 1 还是 0，网络都要被吸引子拖入一个周而复始的圈子，这个圈子不算短，只是还没有长到不可测量。设若这个网络从一种状态转入另一状态需要百万分之一秒，那么，这个小小的网络过一趟状态圈就需要 10^{30} 个百万分之一秒。这等于宇宙年龄之 150 亿年的几十亿倍！所以，我们永远无法真正地观察到该系统会不会“安顿”下来，落入自己的状态圈吸引子！我们永远不会从其灯泡闪闪烁烁的样式上判断出网络是否只是围绕自己的整个状态圈随机闲荡！

希望你读到这儿会停下来想一想。我们正在寻找足以产生出有序动态的规律。我们的布尔网络是不平衡的、开放的热力学系统。由于一个只有 200 个灯泡的小小网络就能不停地闪烁下去到老不重复，那就意味着，在不平衡的、开放的热力学系统中，有序绝不是自动出现的。

可是， $K = N$ 的网络也没有显现出有序的征象。一个网络中吸引子的数目，或者说湖泊的数目，只有 N/e —— e 是基本的自然对数 2.71828。所以，一个 $K = N$ 的网络，若有 100000 个二进制变体，它就会包含 37000 个这样的吸引子。37000 当然不是个大数目。比起它的状态空间的尺度，也就是 2^{100000} 来，它是非常非常非常小的。

现在试想，我们扰乱那个网络，把其中的一个灯泡从关打到开，或从开打到关。在 $N = K$ 的网络里，我们得到蝴蝶效应的一个极端版本。扰动一点点，系统几乎一定要受另一个吸引子的摆布。由于总共有 37000 个吸引子，其长度达到 10^{15000} 种状态，那个小小的波动最终会改变该系统的未来进化。 $K = N$ 的网络是大大的一团混沌。这个家族里是没有免费的秩序了。

还有比这更糟的事呢。试一试随机地调换一下某个灯泡的布尔作用，以此帮助这样的网络进化。那你会改变网络中半数的状



态转变，打乱原来所有的吸引区和状态圈，把所有那一切统统扫进网络的历史垃圾堆。在这里，小小的改变会引起行为的大规模变迁。在这个家族里，不存在可人的、小小的、能遗传的变体供自然选择来施加作用。

大多数布尔网络是混沌的，并且，它们在微小突变方面也是不可爱的。就连 K 大大小于 N 的网络，就算 $K=4$ ， $K=5$ ，它也会表现出不可预测的、混沌的行为来，跟 $K=N$ 的网络大同小异。

那么，这个秩序到底从何而来呢？要我说，秩序，还是突然地、令人惊讶地从 $K=N$ 的网络来的。原来，对于这些规规矩矩的网络来说，状态圈的长度并不是状态数的平方根，而大致上是二进制变体数的平方根。且让我们稍微停一停，把这个道理拆个明白。设想有一个随机建构的布尔网络，其中有 100000 个灯泡，就是说 $N=100000$ 。每一个灯泡接受 $K=2$ 个指令。这个“线路图”看起来就会像一个纠结纷乱的巨大线团，像一个鸟飞不进的密密的丛林。每一个灯泡还被随机地赋予一个布尔作用。所以，此中的逻辑也会是一团类似的乱麻，胡乱装拼起来的，简直是个垃圾堆。那个系统有 2^{100000} 或 10^{30000} 种状态——百万秒差距的可能性——想一想会发生什么？这个庞大的网络竟然会很快地、俯首帖耳地安顿下来，在 100000 种状态的平方根、也就是 317 中间乖乖地周旋。

我希望，这消息会让你兴奋得蹦起来。我的兴奋，自从我大约 3 个 10 年前作出这一发现时，到今还没缓过劲儿来。惭愧呵，可是，这个秩序太让人吃惊了。在每一个状态转变用百万分之一秒的情况下，一个网络，随机地装配起来的，没有丝毫智慧的指引，竟然能够在其吸引子中以百万分之 317 秒的速率周旋。这比起宇宙历史的几十亿倍可是短多了。三百一十七？要换个角度看看这意味着什么吗？你可以问一问，317 种状态，比起整个



的状态空间来，可是极小极小的一部分，大约是1比 10^{29998} ！

我们在寻求秩序的时候并没有煞费苦心地精工细作。还记得我们在第一章里关于封闭的热力学系统的讨论吗？我们论道，在那个系统里，气体的分子散漫开来，挤在盒子的一角或并排在盒子的一面都是不可能的，而更会均匀地充满整个盒子。那些不可能的构形就构成秩序。在这里，在这一类开放的热力学系统中，自发的动态把系统驱赶到它状态空间中的一个无穷小的小角落里，把它拢在那儿作无穷期的颤抖。是免费的秩序。

在这些网络中，秩序展现自身的方式是多样的。毗邻的状态会在状态空间中汇合。换言之，两个相似的初始样式很可能会位于同一个吸引区，从而把系统驱赶到同一个吸引子里来。于是，这样的系统并不显示对于初始条件的敏感性；它们不是混沌的。结果便是我们所寻求的自我平衡。这样的网络一旦靠上一个吸引子，在它受到扰乱时它极有可能会回到同一个吸引子。在这一丛网络树林中，自我平衡是不用一钱买的。

由于同样的原因，这些网络还能经得住线路或逻辑中的突变，而不致飞入混沌。大多数微小的突变会在网络的行为中带来我们所希望的可人的小小改变。吸引区和吸引子只会发生轻微的变迁。这样的系统很容易进化。自然选择用不着拼命为争取进化能力而奋斗。

最后还应该指出，这些网络也不是过于有序。它们不像 $N=1$ 的网络那样，动辄胶结得像顽石。它们还能够作出有弹性的行为。

我坚决认为，我们关于秩序的必要条件的直觉错了一千年。我们用不着煞费苦心地建构；我们用不着精工细作。我们只需要那些个极其复杂的、相互作用的成分能偶尔配成双，如此而已。

我写过一本书，名字叫《秩序的起源：进化中的自组织和自然选择》。我在那本书中显示，有一些办法能调节 K 大于2的



网络，使之有序而非混沌。我有两个同事在巴黎高等师范，一个是伯纳德·德里达(Bernard Derrida)，另一个是盖拉德·威斯波克(Gerard Weisbuch)，都是弄固体物理学的。他们两人显示，摆布一个称为 P 的变量，就能使一个混沌的网络变得有序。

P 参量很简单。图 4.2 显示三种布尔作用，每一种作用接受四个指令。每一种作用中，必须详细开列那个调节灯泡作出的反应，也就是它对四个发出指令的灯泡可能呈取的 16 种状态，从 (0000) 到 (1111)。对于图 4.2a 中显示的布尔作用来说，调节灯泡作出的反应有一半是 1，另一半则是 0。对于图 4.2b 中显示的布尔作用来说，15 个反应为 0，而只有一个指令从调节灯泡那儿得到了反应 1。图 4.2c 中的布尔作用略同于 4.2b 中的作用，惟一的不同是，它喜欢的反应是 1 而不是 0。16 种指令样式中，有 15 种导致了反应 1。 P 仅仅是度量布尔作用中偏离半数为 1 半数为 0 的程度的一个参量。于是，图 4.2a 中的布尔作用，其 P 值就是 0.5，图 4.2b 中的布尔作用的 P 值就是 15/16 或 0.9375，而图 4.2c 中的布尔作用的 P 值也是 15/16，或者 0.9375。

说句事后诸葛亮的话，伯纳德和盖拉德显示的东西基本上是直觉的。假如构建不同的网络，使 P 值越来越大，从不偏不倚的 0.5 到 P 值最大化的 1.0，那么， $P=0.5$ 或 P 稍大于 0.5 的网络就会是混沌的，而 P 值接近 1.0 的网络则是有序的。在其极端的 1.0 的情况下，这一点看得最清楚。那时候，网络中的灯泡只有两类。一类是对什么指令都作出 0 反应的，另一类则对什么指令都应之以 1。于是，不管你在什么状态下启动网络，灯泡的反应都是泾渭分明：0 类灯泡应之以 0，1 类灯泡应之以 1，一经启动，网络马上胶结，呈取的样式非 0 则 1，然后永不改变。伯纳德和盖拉德还显示，不管是什么网络，都有一个 P 的临界值，在那一点上，网络会在有序和混沌之间来回摆动。那就是混



A	B	C	D	E		A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1
0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1
0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1
0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1
1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1
1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1
1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1
1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1

图 4.2 使用 P 参数做细微调整所得的结果。a. 有 4 个输入值时的布尔运算, 16 个输入值中有 8 个返回的值是 0, 另外 8 个返回的是 1。 $P = 8/16 = 0.50$ 。
b. 16 个可能的输入值中, 15 个返回的值是 0, $P = 15/16 = 0.9375$ 。c. 16 个可能的输入值中, 15 个返回的值是 1。 $P = 15/16 = 0.9375$ 。

沌的边缘, 我们一会儿就要回到这个话题。

总结如下: 只要两个参量, 就足以决定任一个布尔灯泡网络是有序的还是混沌的。联系稀少的网络表现内部的有序, 联系繁密的网络则飞入混沌; 每个元素只有一个联系的网络则要胶固住, 呈现愚蠢乏味的行为。但联系的密度还不是惟一的因素。假如网络联系繁密, 调整 P 参量就会把网络从混沌王国驱赶到有序王国。

这些规律也适用于所有种类的网络。在第五章里, 我将要显示, 基因组本身也可被视为有序王国里的一种网络。这样一来, 细胞中的某些有序性质, 长期以来被归功于达尔文式进化的打磨的, 这下子看起来不是那么回事了: 那很可能是从基因组网络的动态中生发出来的——又是一个免费秩序的例子。这一次也是一



样，我希望你能相信，自然选择并不是生命世界里秩序的惟一来源。现在可以说，我们正在讨论的强大有力的自发秩序很有可能不但在稳定的自我催化系统的发生中扮演过角色，在此后的生命进化中也扮演着角色。

混沌的边缘

活的系统，从我们在第三章里所讨论的集体自动催化的原生细胞到你身体里的细胞，直到整个的有机体，当然必须拥有一些网络，行为稳定，表现出自我平衡，并在发生突变时作出可人的小小修正。但是，细胞也好，有机体也好，如要应付复杂的环境，其行为也不能过于僵硬。原生细胞最好能对向着自己漂游而来的新奇分子作出反应。你大肠里的埃希大肠杆菌要应付成千上万种花样的分子，向它的那些酶和基因铺天盖地地发出内部的分子信号，在那些保护着细胞免受毒害的酶和基因的活动中引发各种各样的改变，进行着食物的代谢，还偶尔地跟其他细胞交换DNA。

细胞的网络是怎样做到既稳定又灵活的呢？有一个饶有趣味的新假说，认为网络可能是通过在混沌边缘上达到某种若危若安的状态而做到这一点的。

在我们的灯泡模型里，我们已经看到一些迹象，就是有一个轴线，从有序的行为一直贯穿到混沌的行为。有一些联系稀少的网络， $K=1$ 或 $K=2$ ，会自发地表现出强大的秩序。每个灯泡接受较多输入的那些网络， $K=4$ 或更多的那些，就表现混沌的行为。于是，由低到高调节每个灯泡接受的输入的数目，也就调整着网络的行为从有序变到混沌。此外，我们还看到，调整 P 偏量，从 0.5 调到 1.0，也能改变网络，使之或处于混沌王国，或处于有序王国。



假如在这个轴线上发生了某种行为上的剧变，某种从有序到混沌的状态转变，我们不应该过于惊讶。实际上，我们已经在第三章那些关于生命起源的玩具模型里见到过这样的行为剧变。还记得吧，我们曾经用线绳连结过纽扣，发现当线绳跟纽扣之比越过神奇的 0.5 时，那个最大的集合突然间由小变大。在低于这个值的时候，只存在小小的纽扣集合。越过这个值，就出现由系统中大多数纽扣组成的一个巨无霸部件。这是一种态相转变。

在我们的灯泡网络模型里，也发生一个非常相像的态相转变。又会出现一个由互相连结的元素构成的巨无霸。只是，这里的互相联系的集合不是纽扣了，而是一个巨大的灯泡集合，其中每一个灯泡都胶结为一个固定的活动，1 或 0。若有这么一个巨大的胶结部件形成，那个灯泡网络就处于有序王国。若没有这样的部件形成，网络就处于混沌的王国。就在两者的中间，在靠近这个相态转变的地方，在这混沌的边缘，最为复杂的行为可能发生，有序到足以维系稳定，又充满了弹性和惊奇。那实在就是我们所谓的复杂性。

要看到随机的灯泡网络能发生什么，一个办法就是在脑子里过电影。开始是初始状态的画面。随着网络沿轨迹前行，然后开始环绕它的状态圈，就可以在任一个灯泡上看到两种行为。那个灯泡也许会以某种复杂的样式闪烁不停，也许会堕入一个固定的活动，一直亮着或一直不亮。让我们想象用两种颜色来区别这两种行为：闪烁的灯泡为绿色，一直亮或一直不亮的为红色。

现在设想一个处于混沌王国中的网络，比如说 $N = 1000$ ， $K = 20$ 的这么一个网络。几乎所有的灯泡都在闪烁；于是这些灯泡都是绿的。可能有那么几个灯泡一直亮着或一直不亮；因而这些灯泡都是红的。简言之，在一个闪烁不定的绿色灯泡的大海里，只有几小撮僵死的红灯。这么说，混沌王国里的网络就有着汪洋大海般的绿灯，其中还可能有几个孤岛，那是几小撮僵死的



红灯。

换个样子，设想我们启动一个处于有序王国的灯泡网络，比如说 $N = 100000$ ， $K = 2$ 的这么一个。那将是一个一团乱麻般的巨大网络，其复杂性当得上你身上的基因组，或者说是一个非常非常大的自动催化系统。在其初始状态下启动网络，让它沿轨迹流向一个状态圈，然后让它环绕那个状态圈。一开始，大多数灯泡闪闪烁烁而成绿色。可是，随着网络向其状态圈汇流，然后绕圈旋转，越来越多的灯泡安顿到固定的行为，固定地亮或固定地不亮。于是，大多数灯泡又要变成红色。

奇迹出现了。假如你想到所有的红灯，并察看它们是否相互连接，你就会发现，那些僵死的红灯组成了一个庞大的互相联络的灯泡巨无霸！是一个庞大的僵死灯泡部件，每一个灯泡都胶结于非开即关的状态，在布尔网络中即处于有序王国。

当然，在我们那 $N = 100000$ 、 $K = 2$ 的网络里，不需要所有的灯泡都僵死；一般说来，仍有大大小小的互相联络的灯泡之集合在开关闪烁。这些闪烁的集合呈现绿色。正是那些联系成集的绿灯的闪烁样式构成了有序王国里布尔网络的循环行为。那个巨大的僵死的红灯集合里的灯泡根本就不闪烁。

深入观察典型的 $N = 100000$ 、 $K = 2$ 的网络，我们将会进一步看到一个重要的细节。闪烁的绿灯集合本身并非全都相连。相反，它们形成一些相互依赖的闪烁的灯泡集，像僵死的红灯之海中闪烁的绿色孤岛。

所以，如前所述，混沌王国里的布尔网络有一大片绿色灯泡总在开关闪烁，其中也许还有几小撮红色的灯泡或开或关地僵死着。与此相反，有序王国里的布尔网络则有一大片红灯非开即关地僵死着，那是一个红灯巨无霸，其间有绿色的孤岛在闪烁。读到这儿，你思维的触角应该不由得一动。随着 K 值——也就是每一个灯泡接受的输入的数目——这样的参量的调节，当一个僵死的



巨无霸红灯集形成的时候，就发生从有序到混沌的态相转变，抛下一个个绿灯之岛兀自在那里孤零零地闪烁。

有一个特别容易的办法能看到这一切，那就是在一个方格子上做做一个非常简单的布尔网络模型。让每一个灯泡都跟东西南北四个邻居相连接。每一个灯泡都由一种布尔作用来控制，告诉它如何依四种现行的指令而或开或关。图 4.3 显示的，就是这样的——一个格子网络，是由德里达和威斯波克两人研究的。他们两人把 P 偏量调到离 1.0 足够近的地方，使网络处于有序王国，听任它安顿到自己的状态圈里，然后记录下每一个灯泡的回环周期。如此，回环周期为 1 的灯泡不是僵死于开就是僵死于关。在我们大

```

8 8 1 1228228228228228228 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
8 8 1 1 1 1 1228228228228 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
8 8 8456456456228228228228228 1 1 1 1 1 10 10 10 1 1 1 1
1 8 1 1228228228228228 1 1 1 1 1 1 1 10 10 10 1 1 1 1
1 1 1228228228228228228228 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1228228228228228228228 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1228228228228 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 6 1 1228228228228 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 4 1 6 6 1 1228228228228228228 4 1 4 1 1 1 1 1 1 1 1
1 4 1 1 6 6 6228228228228 1 1 1 4 1 4 1 1 1 1 1 1 1 1
4 4 1 6 6 6 6 6228228228 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 4 12 6 6 6 1228228228228 1 1 1 1 1 1 8 8 8 1 1 1 1 4
220 1 1 1 1 1 1 1228228228 1 1 1 1 1 8 8 8 8 1 1220
220220 1 1 1 1 1 1 1228228228228 1 1 1 1 8 8 4 8 1 1 1
220220 1 1 1 1 1 1 1228228 1 1 1 1 1 1 1 1 1220110 1
1220110110 1 1 1 1 1228228 1 1 1 1 1 1 1 1 20 20110110
1110110110 1 1 4 1 1228 1 1 2 4 1 1 1 1 1 1 20 20110110
110110110110110 1 4 1 1 1 1 2 4 1 1 1 1 1 20 20 20 1110
110110110 22 1 1 1 1 1 1 4 4228 1 1 1 20 20 20 20 20 20 20110
110110 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1228 1 4 1 20 20 20 20 20 20 20110
110 22 22 22 22 1 1228228 1 1228228 1 4 4 1 1 1 1 4 20 2 22
22 88 22 22 1 1 1228 1228228228 1 1 1 1 1 1 1 20 2 1
1 88 1 1 1228228228228228228228228 1 1 1 1 1 1 1 4 4 4 1
1 8 1 1228228228228228228228228228 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

```

图 4.3 免费的秩序。本图是一个二维点阵，上面的每个点（灯泡）与周围的 4 个耦合匹配，并受一种布尔运算法则的控制。当 P 受到任何一个变量的影响，其取值倾向为 1 或者 0 时， P 值接近临界点 P_c ，僵死的灯泡组合会渗透整个点阵，每个的值固定为 1 或 0；而闪亮的灯泡被隔离成一个个孤岛，自由地选择自身的值，或 0 或 1。每个点上的数字，表示的是每个灯泡的循环周期。因此，数值为 1 的点，表示的是红色的灯泡其状态被冻结在“亮”或“灭”上。数值大于 1 的点是绿色的，不停地闪烁，在僵死的点构成的海洋中，就像孤立的“未冻结”的岛屿。

（把这个二维的点阵弯成圆环，像面包圈一样，或是植物的花托的样子，把上下左右的边粘在一起，这样，所有的灯泡就都有四个邻居了。）



脑的影片里，任何这样的灯泡都应该是红色的。另外的灯泡会闪烁，所以应该是绿色的。如图 4.3 所示，周期为 1 的僵死灯泡形成一个互相联系的巨无霸部件，布满整个格子，抛下几个大大小小的集合兀自闪烁。

眼前有了图 4.3 的样子，混沌网络对于初始条件中微小改变的敏感性和有序网络对这种扰乱的无动于衷也就不难解释了。如果一个灯泡被扰动，从这一扰动辐射而出的一系列改变就了如指掌。在图 4.3 所示的这种有序王国里，那些微微的涟漪打不透周期为 1 的那个僵死的红色部件。那个僵死的巨无霸部件很像一道坚定不摇的大墙，把一个个闪亮的孤岛彼此隔开。混乱能在每一个闪亮的孤岛内兴风作浪，但很少能传播得更远。这就是我们有序王国里的灯泡网络表现出自我平衡的根本原因。

但是，在混沌的王国里，一个闪亮的灯泡的汪洋大海充满了整个的网络。任何一个灯泡受到扰动，其后果都将会在没有结冰的大海上漫卷而来，在灯泡的活动样式中造成大规模变迁。所以，混沌的系统对于微小的扰动就表现出大规模的敏感。这便是我们的混沌王国里的布尔网络中的蝴蝶效应。呵，蝴蝶，呵，飞蛾或八哥鸟，扇动你的双翅，精神地或疲倦地一扇，你就将改变从阿拉斯加到佛罗里达的所有灯泡的行为。

不管是原生细胞还是你的细胞，不管是早期的生命还是所有的生命，必定都能作出有序而又有弹性的行为来。是怎样的互相作用的分子的网络，或者是相互作用的任何东西，能够这样自然地既有序又灵活地行为？这样的行为很难做到吗？要么，它也是免费秩序的一部分？我们既已开始理解有着成千上万灯泡的网络中的有序与混沌，个中答案就油然而生了。这答案活泼可爱，甚至还是真实的，这就是：或许，那些正好处于态相转变，若危若安于秩序与混沌之间的网络，是最能作出有序然而灵活的行为来的。



这真是一个美丽的工作假说。圣塔菲研究院的克里斯·兰顿 (Chris Langton) 比别的科学家更注重这一重要的可能性，而且凭直觉我们可以看到，混沌的边缘也许是一个美丽动人的王国，它能够协调复杂的行为。假如谁想拥有一个满是灯泡的格子，它能够协调其中隔得很开的两个灯泡区的活动；设若那格子处于混沌王国，大海上没结冰，那么，某一个灯泡的活动中出现微小的扰动，就会在众灯泡的活动中引起铺天盖地的变迁，变迁会蔓延开来，布满格子，戏剧性地把大有希望的协调搞得丧失殆尽。混沌的系统太混沌了，不能够协调相隔很远的区域的行为。系统不能够将可靠的信号发送到格子的另一边。

反观深陷于有序王国里的格子，那是僵死的红灯的汪洋大海，只有数点孤岛在海中闪烁。你若想协调远处某区域的一系列活动，唉呀呀，没有什么信号能传过那片冰封的海域。没有结冰的，仅仅是那数点孤岛，但它们被彼此隔开，毫无作用了。不可能发生复杂的协调。

可是，在混沌的边缘，闪亮的、没有冰封的岛子像长了卷须的攀缘植物一样相互勾连。扰动任一个灯泡，都可能发出信号，使大大小小的变迁之瀑布冲过格子，到达远方的区域，于是，时间和网络内空间中的种种行为得到了协调。而由于系统处于混沌的边缘而不是真的混沌，它并不堕入杂乱无章的抽动。或许，仅仅是或许，这样的系统能协调我们见之于生命现象的那种复杂行为。

为了讲完这段故事，我要拿出一些证据来说明一个想法，这个想法，我将在下一章里详加论述。想法是：复杂的系统之所以存在下来，存在于混沌的边缘，或虽处于有序王国然而却靠近混沌的边缘，乃是进化使然。虽然自动催化的网络是由于复杂性原理自然而然自发产生的，可后来，自然选择也许调节了它们的参量，拧动 K 值和 P 值的旋钮，一直把它们拧到有序王国里靠近

边缘的地方——有序与混沌之间的转型地带，那里有复杂的行为在繁殖滋长。说到底，能够做出复杂行为的系统确有存活的优势，于是，自然选择便找到了自己的角色：给自发产生的免费秩序塑型。为检验这一假说，我和比尔·麦克里迪 (Bill Macready)，一位读着博士生的同道，还有电脑专家埃米丽·狄金森 (Emily Dickinson) 一起，运用电脑模拟，试着“进化”那些布尔网络，让它们相互之间做一些简单而又高难度的游戏。在这些游戏里，每个网络都要对已经作过的灯泡活动样式作出反应，表演出“恰当的”灯泡活动样式。我们那些会进化的网络可自由地在每一网络的灯泡跟制约灯泡开关的布尔作用间突变出联系来。这样，我们的网络就能改变各种参量，把它们的位置沿着从有序到混沌的轴线来回调整。为了检验我们的网络到底处于有序-混沌轴线的什么位置，比尔、埃米丽和我用一个简单的特征来区分哪是有序王国，哪是混沌王国。在混沌王国，相似的初始状态会渐渐变得不相似，最后在状态空间内分流，沿各自的轨迹越走越远。这正是对于初始条件的敏感和蝴蝶效应。微小的扰动会放大。相反，在有序王国里，相似的初始状态倾向于越来越相似，沿各自的轨迹越走越近，终至汇流。这正是自我平衡的另一版本。把网络扰乱到邻近状态的作用“没劲”了。我们度量沿网络的轨迹发生的分流与汇流的平均值，以便确定它在有序-混沌轴线上的位置。实际上，以此为准则的话，处于态相转变的网络有一个性质：相邻的状态要么分流，要么汇流。

结果怎样呢？随着网络彼此结帮做游戏，尽力适应对方的灯泡样式，电脑模拟选择出了一些更加适应的突变异种，也就是一些玩得更好的变体。在我们要求的适度复杂的行为中，我们发现了什么呢？我们发现，网络的确在适应和改良；它们在进化。不是朝着混沌的尽头上进化，而是朝着有序王国进化，只不过离混沌的边缘不算远。似乎那个处于有序王国之中、但靠近向混沌



转型的位置能做到稳定与弹性的最佳混合。

关于这个工作假说，我们还不能遽下结论。还不能说，复杂的适应性系统就是会朝着混沌的边缘进化。假如事实证明它是真的，那就漂亮了。可是，假如事实证明，复杂的适应性系统会朝着处于有序王国而靠近混沌边缘的位置进化，那也同样漂亮。也许，在轴线上处于这样一个位置，既稳定有序，又不失其弹性，会成为生物界和生物界之外的复杂适应性系统的某种普遍特征。

关于那些美丽的可能性的细节，我们且留待随后的几章来讨论，因为，那个假说，即复杂的系统可能向着混沌的边缘或向着有序王国里靠近混沌边缘之处进化，似乎也可以应用于个体发生学那场从受精卵发育成鸟、成蕨菜、成跳蚤和大树的宏伟壮观的有序之舞，可以说明其中的大量特征。但我要再次告诫读者朋友，莫要遽下结论，因为，在此阶段，还是把那个潜在的普遍规律仅作为一个令人着迷的工作假说更为明智。

与此同时，我们也可以开始疑心，我们已通过对庞大的布尔网络做简单模型有些理解了自组织的美妙力量，或许就是动态秩序的最终源泉。这些开放的热力学系统中的秩序或许就来自那个有序王国；进而，那个有序王国的秩序，或许就是来自那个事实：相邻的状态倾向于合流。这么说，那个系统是把自已“挤”到了一些小小的吸引子里。最终，是这种把自已挤到无限小的状态空间的作业构成了有序。尽管我把它称作免费的秩序，意思是说，这种秩序是自然而然和自发产生的，从热力学的角度上说它可不是免费的。相反，在这些开放的系统里，系统把自已挤到小小的状态区域的作业，是付出了热力学代价的：它向环境输出了热量。并没有违反、甚至也没有挑战热力学的任何定律。新鲜的只是，巨大的开放热力学系统可以自在于有序王国之中。这样的系统可能是我们要求于稳定的自我繁衍、自我平衡、还有可人的遗传变异的那种秩序的天然来源。



如果我们，还有古往今来的无数学者，还没有开始理解作为秩序来源的自组织的伟力，那么，达尔文也没有。出现于庞大的、随机组装的、互相联系的二进制变种网络的秩序，几乎必然只是千态万状的复杂系统中类似的自发秩序的先驱。我们可能正在为恩赐给整个生命世界的秩序发现新的基础。假如是这样，那么，关于生命以及我们在其中的地位的观念，又会来一番怎样的改变。说到底，选择并不是秩序的惟一来源。是巨大的秩序，是命中注定的秩序，是免费的秩序。这个宇宙可能就是我们固有的家园，只不过我们几乎还没有开始理解何以会这样。



第五章 个体发生学之谜

至少从距今 5.5 亿年前的寒武纪生命形态大爆炸那时起，甚至已有 7 亿年了吧，多细胞的生物体就掌握着一个无人能解的秘密：个体发生学。通过某种神秘的进化创造性，寒武纪的新生物们，后来的后来还有智人（*Homo sapiens*），就会从一单个细胞开始自己的生命，那个细胞是个受精卵，也叫合子，是父母结合的果实。不知怎的，那个细胞会生发出一个完整的结构，一个组织良好的整体，一个生物。假如你惊奇于某一个螺旋状的星系中那一窝子星星，在高高的乌暗暗的太空中成团地涡漩，旋来旋去竟然在共同重力的作用下生出秩序来，那你想到我们自身的个体发生学的时候一定会同样惊奇。那一单个细胞，不过数万种分子抱成一团，它怎么会知道，如何造作出那么错综复杂的人类婴儿来？没人晓得。假如能人曾经纳闷儿过自己是怎么来的，假如克罗马努人^①曾经纳闷儿过自己是怎么来的，那我们也应该好好

① 克罗马努人（Cro-Magnon man）史前人类的通俗名称，最初是给 1868 年法国多尔多涅省埃西德塔雅克附近克罗马努一处岩棚里出土的史前人类的几具骨架定的名称。法国地质学家路易·拉尔泰在该地进行了发掘，并将遗址划分为 5 层覆有灰土层考古学层序。其中克罗马努人的遗存保存在最上层，属于旧石器时代晚期（距今 3.5 万至 1 万年），从其遗址洞穴的发现来看，克罗马努人既是出色的猎手，也是优秀的艺术家。——译者注



想想。

那么，就从那个受精卵开始吧。卵子由精子受精以后，人的受精卵就开始快速地分裂。那是一种细胞分裂，创造出一个小小的细胞团。这些细胞顺着输卵管迁移，进入子宫。在迁移的途中，细胞团形成一个中空的球。少量的细胞，称作内部细胞团的，从空心球的一极往里面移动，栖居在剩下的表层的内壁上。所有哺乳动物都开始于这个内部的细胞团。在人类，那些作了外层的细胞专事于钻营子宫的内衬，形成了胚胎的外膜，以胎盘和其他的方式在我们出生前支持着我们。

这还是最最初级的阶段呢，我们就已经看到了个体发生学或发育的两大基本过程。第一是细胞分化，第二是形态发生。受精卵既是一单个细胞，又必定是独一无二的一种细胞。在受精卵和新生儿之间，大约发生 50 轮细胞分裂。在这个过程中，那一单个细胞生成了林林总总的一窝子不同类型的细胞。据认为，人体内存有 256 种类型的细胞，各有分工，在各种组织和器官里起着特定的作用。笼统地讲，我们的组织来自三个称作萌芽层的实体：内皮层、中胚层和外皮层。内皮层产生的细胞和组织长成了肠道、肝和其他组织。形成了一大窝多种多样的细胞型式，从胃内壁那些特化的细胞，它们会分泌帮助食物消化的盐酸，直到肝细胞，它们帮着给血液解毒。中胚层生出了肌细胞、形成骨头和软骨的细胞，还有形成血液的细胞，包括那些输送氧气的红细胞和专管免疫的白细胞。外皮层则生出皮肤细胞和极其多样的神经细胞，构成了周边神经系统和中枢神经系统。

简而言之，人的受精卵经过了大约 50 轮的细胞分裂，创造了你身体内的 2^{50} 或 10^{15} 个细胞。最初的合子沿着分枝状的道路分化，产生出 256 个类型的细胞，是这些细胞构成了人类婴儿的种种组织和器官。细胞类型的日趋多样化称为分化；它们互相协作、构成组织和器官的活动称作形态发生。



我从事生物学，就是因为那宏伟壮观的细胞分化的奇迹彻底征服了我。假如在本章里我什么也没有做成，只是传达了这份惊奇，我也会心满意足。当然，我希望的比这个多些，因为我相信，前面几章里讨论的自发秩序将会是个体发生学的最终来源。

还记得胚中预存说的论调吗？他们说，合子里包含着一个小人儿，不知怎么随着发育而扩张为一个成体。还记得这类论调的困境吗？假如那样，就需要数量无穷的祖宗，也会产生出无穷无尽的后代。还记得汉斯·德莱希（Hans Dreisch）吗？他曾经用头发丝分离两细胞阶段的青蛙胚胎，发现每一个细胞都长成一个完美的、只不过小一点的青蛙。怎么会两个细胞都保留着长成整只青蛙的信息呢？

不止是青蛙掌握了变这个戏法的秘诀。胡萝卜的发育能力更其邪门儿。假如一根胡萝卜破碎成一个个细胞，实际上每一个细胞，不管是什么类型的，都能生长出一整棵胡萝卜。那些细胞，怎么能一方面经过了分化，各司其职，同时又保留下长成整个生物体所需的信息呢？

20 世纪初，人们重新发现了孟德尔定律，建立起染色体携带基因的理论。此后，人们一度以为，合子里含有全数的基因，但面向生物体内的不同细胞型式，它们解析为不同的子集。只有那生出精子或卵子的原初生殖浆才留存着全套基因。可没过多久，基子对细胞的微观研究，就已经清楚，除了极少数的例外，生物体内所有类型的细胞都包含全套染色体。所有细胞都携带合子所拥有的所有遗传信息。晚近一些的研究，更从 DNA 水平上支持了这一观点。几乎所有多细胞生物体内的几乎所有细胞都包含同样的 DNA，只不过有些例外而已。在有些生物，来自父母的全套染色体会全部丢失。在某些生物的细胞内，染色体作了重组和轻微的修改，以产生与入侵者作战所需的抗体。可大致说



来，你身体内所有细胞里的基因组都是完全一样的。

人们越来越意识到，多细胞生物体内的所有细胞都拥有同样的基因组。这一认识导致了可称之为发育生物学里的中心教条的东西，这就是：细胞之不同，是因为有不同的基因活跃在生物体内不同型式的细胞中的缘故。于是，血红细胞表达的是编码血色素的基因，免疫系统里的 B 细胞表达的是编码抗体分子的那些基因，附骨肌的细胞表达的是编码了构成肌纤维的肌动蛋白分子和肌浆球蛋白分子的那些基因。神经细胞表达的是编码某些特定蛋白质的基因，是那些蛋白质构成了细胞膜里特定离子的传输渠道。某些内脏细胞表达的基因编码了导致盐酸的合成与分泌的那些酶。

然而，是什么机制，使一些基因活跃而其他基因受到抑制呢？在合子展开、成为机体的过程中，各种类型的细胞又是怎样知道表达哪一种蛋白呢？

雅各布，莫诺和遗传回路

两个法国生物学家，弗朗索瓦·雅各布和雅克·莫诺，于 20 世纪 60 年代中期获得诺贝尔奖，令他们获奖的研究工作为我们提供了解释细胞分化和个体发生学的概念框架的雏形。

前面提到，蛋白质的合成，要求编码它的基因把 DNA 转写成 RNA，相应的信使 RNA 再通过基因编码翻译成蛋白质。雅各布和莫诺通过研究肠道里的细菌埃希大肠杆菌的行为及其对一种称为乳糖的糖类的反应作出了这一发现。那时已知，刚刚把乳糖加进培养基的时候，细胞不能利用那种分子。针对乳糖分解的那种酶，叫做 β 牛乳糖酶的，在菌细胞中还没有足够的浓度。可是，加进乳糖数分钟后，埃希大肠杆菌的细胞便开始合成 β 牛乳糖酶，然后开始利用乳糖，作为细胞生长和分裂所需的碳的



来源。

不久，雅各布和莫诺就发现了这种酶感应现象——这个术语是用来指称乳糖感应 β 牛乳糖酶合成的能力的——的控制原理。原来，控制是在 β 牛乳糖酶转写为相应信使 RNA 时发生的。两人发现，在 DNA 中靠近这一结构性基因的地方——叫它结构性基因，是因为那种基因编码着蛋白质的结构——有短短的一串分子跟蛋白相连。那个短串叫做行动者。跟行动者相键接的那个蛋白叫做压迫者。顾名思义，当压迫者蛋白跟行动者上的地址相键接的时候， β 牛乳糖酶基因的转写便受到压制。于是，管这种酶的信使 RNA 就没有形成。

这就是那个调整的奇迹。乳糖进入埃希大肠杆菌细胞后就跟压迫者键接，改变其形状，使压迫者跟行动者脱钩。于是，乳糖的添加就把行动者地址解放出来。一旦行动者得到自由，邻近的 β 牛乳糖酶结构性基因就开始转写，不久就有 β 牛乳糖酶产生出来。

雅各布和莫诺发现，一个小小的分子就可以“启动基因”。由于压迫者本身就是另一埃希大肠杆菌基因的产物，不久就清楚了，基因之间能形成遗传回路，并能够彼此打开、关闭。到了1963年，雅各布和莫诺写了一篇极富创造性的论文，提出细胞分化一定是由这种遗传回路控制的。在最简单的情况下，两个基因会彼此压迫。且想想这么一个系统。假如基因1压迫基因2，基因2又压迫基因1，那么，这样的系统就会有两种不同的基因活动样式。第一种样式，是基因1活跃而压迫基因2；第二种样式，是基因2活跃而压迫基因1。有这两种稳定的基因表达样式，这个小小的遗传回路就能造出两种不同的细胞类型。每一个类型将都是同一遗传回路的另一样式。如此，两种类型又有着同一个“基因型”，同一基因组，但能够表达不同的基因组合。

雅各布和莫诺解开了一个大难题。两人的研究工作不但指出



了细胞分化是如何发生的，而且无意中揭开了分子活力之谜。压迫者蛋白用自身的一个特殊地址链接一个行动者地址。乳糖分子（实际上是异乳糖的一种代谢产物）链接到压迫者蛋白上的第二个地址。异乳糖分子的链接改变了压迫者蛋白的形状，从而改变了它的第一地址的形状，从而也降低了压迫者蛋白对于行动者 DNA 地址的亲合性。于是，异乳糖就通过链接压迫者上的第二地址把它从行动者那儿“拉开”，从而促成了使乳糖发生代谢作用的基因即 β 半乳糖酶的合成。可是，由于异乳糖是通过压迫者蛋白上的第二地址，称作异乳糖地址，发生作用的，这第二地址不同于链接行动者 DNA 串的那个地址，这意味着，异乳糖分子的形状跟其行动的最终结果——它控制基因活动的能力——没有明显的关系。与此相反，基质却必须与它的酶相匹配，而一个第二分子，一个与之竞争的抑制者——通过链接到同一酶地址来抑制那个酶——看上去必须像那个真正的基质。在这个大家熟悉的情况下，基质跟与之竞争的抑制者必定有着相似的分子特征。但是，由于异乳糖是在压迫者的第二地址上起作用，而不是在压迫者的 DNA 链接地址上起作用，异乳糖也可能被用作控制编码肌动蛋白、肌浆球蛋白或某种酶的某种信号，那种酶可能跟盐酸的合成有关系。那种控制分子的分子，其形状不一定非得跟被控制过程的最终生成物有关系。两位作者都强调，从分子的角度来看，通过第二地址起作用，意味着莫大的自由：它可以任意地创造不同逻辑、不同复杂性的遗传回路。

选择是秩序的惟一来源吗

发现可以随意地建造遗传回路，莫诺惊喜莫名。他写了一本漂亮的书，名为《偶然与必然》。书中，莫诺出语惊人，写下了我在前面提到过的那个优美而抒情的短句：“进化乃是撞上了大



运。”就我愚陋所见，这个短句是最能抓住达尔文以来我们那种不可言传的天马行空的感觉了：天马行空地寻找随机突变，从一大堆无用的秕糠中挑选出稀有的有用形式，这是何等的惬意，何等的自由呵！

我已经反复说过，达尔文以来，我们一直把自然选择看作是生物体内秩序的惟一来源。这可不是小事一桩，因为这个意象直处于我们的生命观的中心，就是认为，所有生命、所有生物、所有生民，在深层的意义上都是偶然的，是一大堆历史事件凑成的。如前所述，雅各布强调，进化是一机会主义者，无一定计划，无一定方向，敲敲打打，拼拼凑凑，净造作些中看不中用的洋玩意儿。我们这种东西，只不过是古今设计难题的一些特殊答案而已。我们，当代分子版的鲁本·戈德堡式的复杂装置，是我们前面的鲁本·戈德堡式洋玩意儿的后代。

可是，如果作用于随机变异的自然选择是秩序的惟一来源，那么，我们就应该两倍地惊异：一则惊异于这秩序之宏伟，二则惊异于这秩序竟是如此的出人意表，如此稀罕，如此珍贵。我们是意料之外的，在无情的茫茫宇宙中茕茕孑立，举目无亲。但是，自然选择真的独自作业，在生命的出现及其随后的进化中作着秩序的惟一来源吗？我不这么认为。我从肠子里不这么认为，从梦里不这么认为，根据我 30 年的研究，根据越来越多的其他科学家的研究，我都不这么认为。

我是从哲学而心理学，从心理学而生理学，从生理学而走进生物学的。我有幸提前 6 个月毕业于达特茅斯学院。正式毕业的时间要算 1961 年。上大学前按要求接受了半年的野外训练，登山，滑雪，在大小山坡上穿来穿去，吃、睡在一辆我自己粗粗装备了一番的露营用大众车上，地点倒是一等一：是在奥地利的圣安东，在驿站旅馆的停车坪上。我上的是牛津大学，用的是马歇尔奖学金。



我有两个老师，一个是哲学家杰弗里·瓦诺克(Geoffery Warnock)，一个是心理学家斯图亚特·萨瑟兰(Stuart Sutherland)，两人都重视从实验得出发明。语言真的先于认知吗？一个中性的线路如何能够让眼睛看出两条平行线之间比视网膜上的视锥或视杆的宽度还要小的偏差？要做发明就要接受训练，我受到英国传统里允许并受到鼓励的一种颇值得仿效的训练：英国人喜欢行为古怪的人。有位仁兄喜欢一边洗澡一边大唱格利高里圣歌。这样的环境培养一种精神，连许多学物理的都羡慕不已。有一回，沃尔夫冈·泡利(Wolfgang Pauli)听说一个年轻同事提出一条理论，他的反应是：“真是发疯！可惜疯得不够。”假如莫诺和雅各布在进化的根本之处看到了分子的天马行空，那么，难道我们就不该在整个科学这一行当的根本之处寻求心智的天马行空吗？要永远允许自己和同事大发其疯。世界会告诉我们对还是错。

从最根本上说，科学因我们提出的问题而生长。那么，这些问题来自何处呢？我不知道。可是我的确知道，我本人一直希望，生物体内的秩序会被理解为是自然的、期待之中的。我一直有个梦，我梦想，自然选择在塑造生命时应该始终有个合伙人，那就是自组织。

假如自然选择很不容易找到一种遗传机制让合子漂亮地展开，那么，出现现在的结果就未免太出格了：那将是雅各布理论所意味的敲敲打打拼凑起来的洋玩意儿。所以，作为一个学医的，我忽然有个希望，希望庞大的基因之网能自发地展示个体发生所必需的秩序，希望有某种神性，某种规律，某种自然而不可避免的东西跟我们有关。

个体发生学里的自发秩序

并且，像我们在第四章里显示的，我所梦寐以求的自组织是



无所不在的。我提出，秩序，免费的秩序，乃是个体发生学中秩序的最终源泉。我得警告读者，这是一个异端的观点。可是，我们已经遇到过的自发秩序太有力了，假如我们不是极其认真地对待它，不去认真考察个体发生学里的秩序是否真有可能自发产生、尔后由自然选择来打磨塑造，那我们似乎就真是冥顽不灵了。

雅各布和莫诺告诉那帮子巴不得相信其理论的生物学家，说基因能彼此打开、关闭，说遗传线路会拥有可供选择的不同的基因行为模式，是那些不同模式构成了生物体不同的细胞类型。那么，这种遗传网络有怎样的结构？又是怎样的一些规律制约着基因及其产物，让它们两两配对儿，结成控制之网来支配个体的发生呢？

我在第四章里造出布尔网络模型并加以讨论，就是为了探讨这些问题的。请回想一下我们曾经考虑过的那些东西：一些灯泡，能彼此打开、关上。我把这些灯泡比作酶，它们促进或抑制彼此的生成物的合成。可是，同一个意思也适应于雅各布和莫诺的遗传调节线路。我们可以把结构性基因看作是 β 牛乳糖在开开关关，被转写或不被转写；可以把压迫者蛋白看作或链接或不链接行动者地址，也就是非开即关。可以把行动者地址看作有空档或无空档，也就是非开即关。可以把异乳糖看作要么跟压迫者蛋白的第二地址有联系要么跟它没联系。诚然，这是理想化了的，但是，我们还是可以把这种看法扩展到基因及其相互作用的产物所构成的网络——这些网络是更大的协调线路的组成部分。

大体上，我们可以构建一个布尔网络模型来模拟遗传协调系统。这样一来，灯泡的“线路图”就意味着基因及其产物间的分子协调关系。在当前上下文中，压迫者蛋白就是对行动者的一个分子协调指令，而行动者本身也就是对于 β 牛乳糖基因的协调指令。布尔作用，或者说显示是哪些灯泡样式在打开或关闭一个被



协调的灯泡那些规律，现在就意味着激活或抑制某特定基因活动的分子信号的组合。比如，行动者是由压迫者和异乳糖两者控制的（图 5.1）。行动者由压迫者与之键接，除非有异乳糖键接了压迫者，并把压迫者从行动者那儿拉开。所以，行动者是由布尔运算法则中的“除非”作用控制的。制造 β 牛乳糖的基因是活跃的，除非有异乳糖的存在。

在第四章里我们显示过一些布尔网络模型，现在我称它为基因网络模型，其中， N 基因可能有 2^N 种状态；在那些状态下，不同的基因组合在开开关关。用动态系统的语言来讲，就是它的状态空间包含 2^N 种可能的基因行动。还记得吗？当基因依据布尔定律、在分子指令的作用下开关的时候，这样的网络在状态空间中就依循某种轨迹。最终，轨迹要汇入一个状态圈吸引子，然后，系统就将永远不变地绕那个吸引子旋转。多种多样的轨迹可能会全都汇入同一个状态圈，就如众水汇入湖泊。状态圈吸引子就是那个湖泊，而那些汇入它的轨迹就是湖泊的流域（吸引区）。任一个布尔网络、因而任一个染色体组调节模型，必定至少都有一个这样的状态圈吸引子，也可能有许多个，每一个吸引子都有自己的吸引区。

第四章的目的，实际上，我早期对于网络模型的一些研究工作的目的，就是希望弄清楚，有着数千对儿灯泡的庞大网络，是否会自发地表现出秩序。结果发现了大规模的秩序。我们发现，就连含有多达 100000 只灯泡、状态空间达到 2^{100000} 也就是 10^{30000} 的网络，也会安顿下来，循一个小小、小小的、只有 317 种状态的状态圈转圈子。是免费的秩序。我说过，317 比 10^{30000} ，等于是那个网络把自己挤进了相当于自己状态空间的 10^{29998} 分之一的一个角落。

我没法给你显示这样一个深不可测的状态空间。图 5.2 显示的，是四个仅有 15 只灯泡组成的小小网络，这样的网络大约会

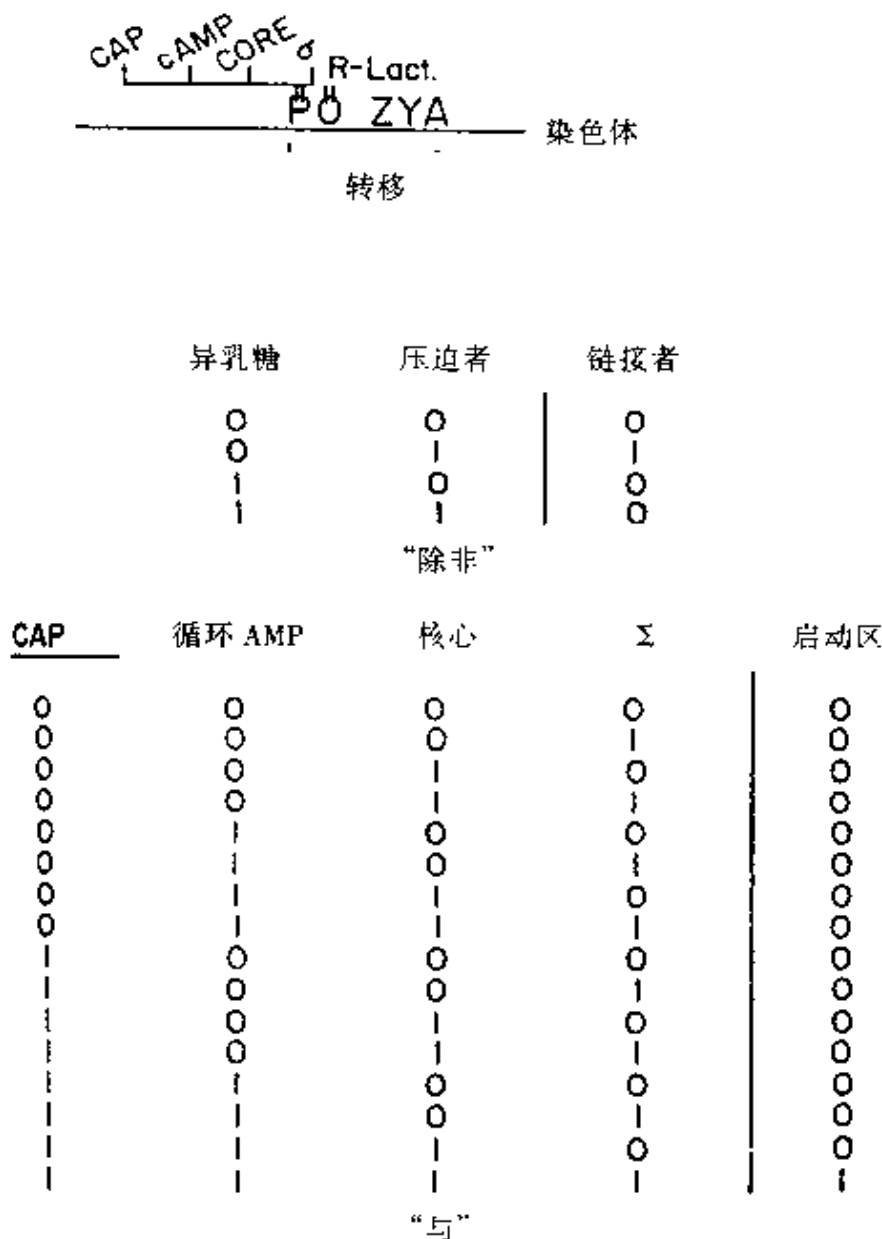


图 5.1 遗传线路图。上图显示的是埃希杆菌的乳糖操纵子。Z, Y 和 A 是结构基因; O 是链接地址。P 是行动者地址, 而 R 是压迫者蛋白, 与行动者相链接, 阻碍遗传信息的转移, 除非自身和乳糖或乳糖的代谢物异乳糖的链接。(启动区受到四种分子因素的制约: 循环-磷酸腺甘、核心 RNA 聚合酶, Σ 因子和 CAP。)中间的图显示的是用于描述受到压迫者和异乳糖作用的操作者的布尔运算法则。对于操作者地址来说, 0 表示自由, 1 表示链接。对于压迫者和乳糖来说, 0 表示空缺, 1 表示存在。布尔运算法则中的除非运算规定了在目前状态下, 接受四个可能的分子赋值, 操作者下一时刻的行为。下图显示的是启动区在它的四个分子赋值时的规则。这里的四个变量的布尔运算是与运算。



有 32000 种状态或闪烁样式。你可以想象，在那个巨大的网络状态空间里，每一个吸引子都像是一个小到极点的黑洞，要把落入其吸引区的所有东西吸入其中。整个的、大到不可思议的状态空间破碎开来，破碎成数量不多的这样的黑洞，每一个都要求周围那百万秒差距大的状态空间向它汇流。在任何地方解放这个系统，它都会像宇宙飞船向终点飞驰一样，一头栽进空间中的那一小点，也就是那个吸引子；是它吸引着那个系统不可避免地向前疾飞。

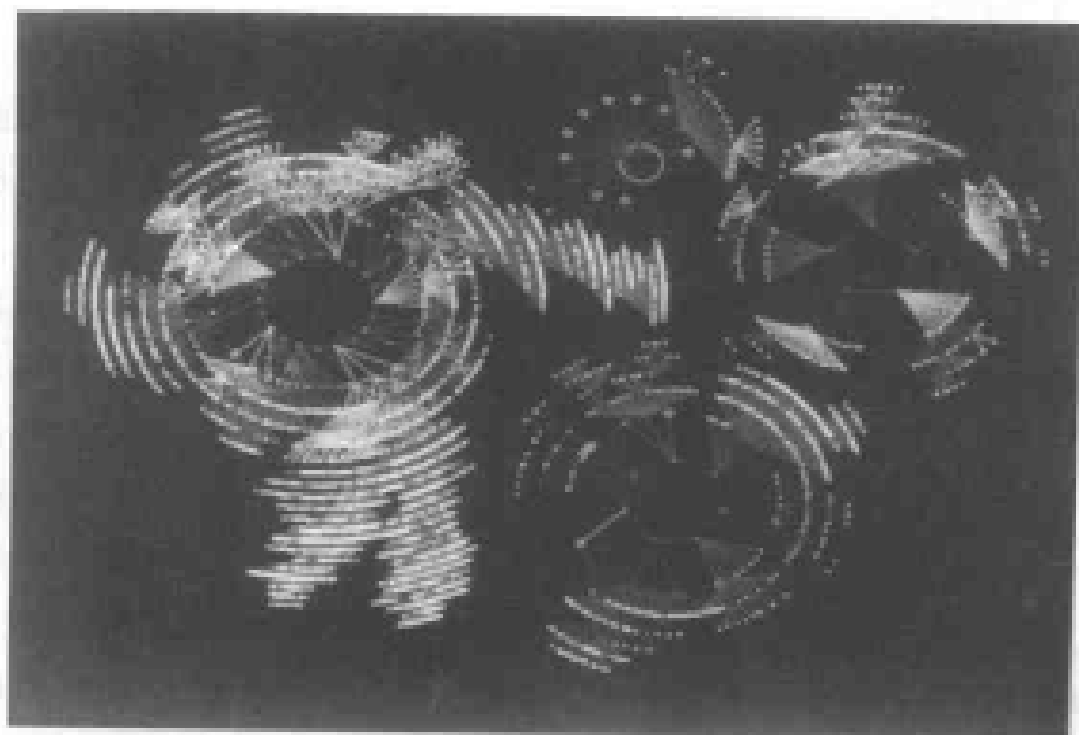


图 5.2 吸引区。四个吸引区和吸引子状态在这个舞台——或者说这片行为区域——上演，组成一个随机的布尔网络，其中 $N = 15$ 个双字节变量，而 K 表示的是对于每个双字节变量有两个输入值。此图是安德鲁·温舍 (Andrew Wuensche) 用他在圣塔菲编制的程序计算获得的。

小小的吸引子，太大的秩序

雅各布和莫诺提出，他们那个基因线路的两种可供选择的稳



定样式——要么基因 1 开而基因 2 关，要么基因 1 关而基因 2 开——就是同一个基因网络的两种不同的细胞类型。而我却认为，在基因网络那样的巨大状态空间里，每一个黑洞似的状态圈吸引子就是一种不同的细胞类型。一个含有哪怕是有限数目的基因的网络都有可能周旋于一个巨大的状态空间。但是，假如我是对的，那就是寥寥几个吸引子在朝几个有限的方向拉动这个网络。依网络所绕之旋转的状态圈之不同，不同的基因会被打开或关闭，也就意味着会造出不同的蛋白。基因网络的作用就像是一种不同的细胞。

从这一个假说可以推导出许许多多预言来。基因系统和个体发生学中的许许多多特征似乎都会各归其位，在这一新的观念框架里各得其所。所以说，虽然这一新的假说还有待证实，但已经有很多证据支持它了。

让我们重述一下个体发生学的问题吧。人类基因组编码着 100000 来种结构性基因和不计其数的行动者、压迫者、促进者（只把别的基因打开而不是关闭），等等，等等。这一大些基因，跟它们各自的 RNA 和蛋白生成物一起，都连入一个纵横交错、交互作用的协调性网络，也就是基因协调网络；它们的行为的总和协调着从受精卵到成体的发育。人体有 256 个细胞类型。果蝇（*Drosophila melanogaster*）有大约 15000 种结构性基因和 60 个细胞类型。水螅的基因组小得多，有 13~15 个细胞类型。是些什么样的原理在统率着这样一些遗传协调网络，让它们发生出如此精细的个体发生学秩序来？

仔细考察细菌和更高等次的生物，就会发现三个特征：

1. 任一基因或其他分子变体，都是由相当少的分子指令直接协调的。比如，前面讲过的乳糖行动者就是由两个分子指令协调的，这两个分子，一个是异乳糖，一个是压迫者蛋白。

2. 描绘基因活动的布尔定律，会因所描绘的基因的不同而



不同。于是，乳糖行动者是依据布尔定律中的“除非”作用而被乳糖解除阻遏的；其他基因则是在布尔定律中的“或”或“与”作用下被分子指令激活的，等等。还有一些基因则遵循更为复杂的规律。

3. 运用理想化的方法，即把基因看作只有两种行为变体，也就是在转写中活跃或不活跃两种情况，尽管这样说来控制它们的指令要么存在，要么不存在，但是，抑制基因还是由布尔作用的一种特殊的子集来协调的，那种子集我将称之为“疏导”作用，一会儿它将更确切地显示其特点。

有一个事实令人吃惊：几乎任一个具有这三种已知性质的基因协调网络都会表现我们所希望的免费秩序。这些已知的性质已经预言着生物世界里的许多有序现象。

在第四章里，我们看到，巨大的二元素网络，也就是随机的布尔网络，一般地都会三个王国里行为：混沌王国，有序王国，还有一个是处于混沌边缘的复杂王国。我们看到，两个简单的约束就足以保证被约束的集合里的大多数成员处于有序王国。第一，假如每一元素所接受的指令为 $K=2$ 或更少，整个集合就会处于有序王国。第二，假如一个网络里每一灯泡所接受的指令超过 $K=2$ ，还可以调节布尔定律中的某些偏量如 P 参量，来确保秩序。

还有另一个途径能确保行为有序，那就是用所谓的疏导性布尔作用来构建网络。这些布尔定律脾气很好，至少一个分子指令有一个值，非 1 即 0，就可以完全地决定被协调基因的反应。

“或”作用就是疏导作用的一个例子（图 5.3a）。一个受这一作用协调的元素，如果其第一个，或第二个，或两个指令在当前瞬间是活跃的，那么下一个瞬间它就将是活跃的。于是，如果第一个指令是活跃的，那么，那个被协调的元素下一瞬间必定是活跃的，不管第二个指令如何。这一性质即定义着疏导性布尔作用。



至少一个指令有一个值，或 1 或 0，仅此一条，就足以保证被协调的变量有一个值。

用布尔理想化的方法来看，我所知道的那些病毒、细菌和更高等次的生物体内，几乎所有被协调的基因都是由疏导性布尔作用支配的。如图 5.1 所示，行动者地址是受制于布尔作用中那个疏导性的除非作用的。假如压迫者缺席，那么，行动者地址就一定是空档，不管异乳糖存在与否。假如有异乳糖存在，行动者也必定是空档，不管压迫者蛋白存在与否。之所以会是这样，是因为异乳糖键接着压迫者上的变构地址，将其从行动者地址那儿拉开。

大多数含有多个指令的布尔作用不是疏导性的。这就是说，它们没有那种性质，即任一个指令自身就能够决定被协调的灯泡的下一状态。最简单的例子就是图 5.3b 所示的有两个指令的“仅或”作用。一个被这一作用协调的基因下一个瞬间将会是活跃的，假如两个指令中有一个、而非两者，在当前瞬间是活跃的。你会看到，两个指令，1 或 0 当中，没有一个指令自身就足以保证被协调基因的活动。于是，假如第一个指令为 1，那么，被协调的基因可以是活跃的，假如第二个指令为 0；或者，它是不活跃的，假如第二个指令为 1。假如第一个指令为 0，那么，被协调的基因可以是活跃的，假如第二个指令为 0；或是不活跃的，假如第二个指令为 1。同一个故事，对于第二个指令也成立。它没有什么活动能确保被协调基因的行为。

被协调的基因，还有大多数其他生化过程，它们之似乎受制于疏导作用，可能不是偶然的。因为，在所有可能的布尔作用中，疏导作用是罕见的。随着 K 值，也就是指令数目的增加，这种作用就更加罕见了。可是，疏导作用从化学上讲是容易构成的，所以，疏导作用的多见，要么反映了对布尔定律稀有品种的选择，要么反映了化学简单性。不管怎样，疏导作用的多见，



A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

a

A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

b

图 5.3 布尔运算。a. 有两个指令的或运算。如 A 或 B(或两者都)为 1, 则 C 为 1。b. 布尔有两个指令的“仅或 (exclusive or)”运算。如 A 或 B (但不可同时) 为 1, 则 C 为 1。

对于基因协调系统的有序行为似乎是非常重要的。

不难看出, K 值不同的布尔作用数目可能有 2^{2^K} 种。指令数为 K 时, 活动的可能组合数为 2^K 种。布尔作用必须选择对每一这样的指令组合作出或 1 或 0 的反应, 于是得出那套公式。这些作用的疏导性部分在 $K=2$ 的网络中比例是非常之高的; 实际上, $K=2$ 指令的 16 种布尔作用中, 有 14 种是疏导性的 (图 5.4)。只有两种作用, 一种是“仅或”, 一种是与之互补、称作“假如而且只有”的作用, 不是疏导性的。可是, 在 $K=4$ 指令的那 64000 来种布尔作用中, 只有 5% 的作用是疏导性的。随着 K 值的增加, 疏导性作用更多地下降了。

从分子的角度来看, 疏导性作用是容易构成的。设想有一种酶, 它有两个指令, 任一指令活跃, 两个就都被激活。这种作用就容易构成。我们只需要做一个酶, 让它只有一单个异乳糖地址。两个指令中只要有一个跟这个地址链接, 就可以改变酶的构造而将其激活。这就是那个疏导性的“或”作用。可是, 怎样造出一种酶, 让它实现那个非疏导性的“仅或”作用呢? 那将需要两个不同的异乳糖地址。其分子指令或效应器链接上任一地址, 都会改变那个酶而将其激活。可是, 同时链接上两个异乳糖地

1	2	3
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	0

1	2	3
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

1	2	3
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	0

1	2	3
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	0

1	2	3
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

1	2	3
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	1

1	2	3
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

1	2	3
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

1	2	3
0	0	1
0	1	0
1	0	1
1	1	0

1	2	3
0	0	1
0	1	1
1	0	0
1	1	0

1	2	3
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

1	2	3
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	1

图 5.4 $K=2$ 时,可能存在的 16 种布尔运算法则。

址，或两个都不键接，却不会引起同样的改变而将其激活。这样的分子机器当然是可能的，但比起制作“或”作用来就显然难得多了。一般来说，制作能够实现疏导作用的分子装置，似乎比制作非疏导性作用的装置要容易些。

疏导性作用的化学简单性之所以重要，就在于：主要由疏导性作用支配的大的二元素网络自然而然处于有序王国。巨大的免费秩序非常丰沛，到处都是，就等自然选择前来细加收拾。假如疏导性作用就因为化学上简单而充满了各种各样的细胞，那么，这个化学简单性本身就足以生发出大量的、大规模的自发秩序。



我相信，这个自发秩序对于我们理解基因组是至关重要的。因为我们的细胞里包藏着 100000 多种基因，人类基因协调系统的状态空间至少有 2^{100000} 或 10^{30000} 那么大。我们曾经说过，这个数字比起我们所知道的任何东西来都大得失去了意义。对于这么一个巨大的状态空间来说，细胞类型意味着什么呢？发生生物学的中心教条只是说，不同的细胞类型就是同一个基因组系统的不同活动样式。当我们考虑到人类基因组能作出至少 10^{30000} 种基因活动组合的时候，说那样的话还有什么意思吗？如果我们放弃非开即关这个理想化，而想到基因能够作出各种等次的表现来，酶也能做出各种等次的活动来，那么，可能性的范围就更大了。不管是理想化的开和关，还是实际上的多样化活动等次，细胞都不可能探寻那么大的基因活动样式，就是把大爆炸以来可能存在的所有世界里可能存在的所有生物的生命全部加在一起，也不够细胞作那样的探索。

如果我们接受下述的可能，这一秘密也就初见分晓了。这种可能性就是：基因网络因其构成方式而处于有序王国。这样的一个网络并不是满地图上到处漫游，而是为状态空间里的小小黑洞似的寥寥几个吸引子所吸引。一个围绕特定吸引子周旋的细胞会表达为一定的基因和蛋白，使自己作为特定类型的细胞而行为。同一个细胞，假如围绕另一个吸引子周旋，就将表达为不同的基因和蛋白。于是，我们的框架性假说就表述为：不同的细胞类型就是基因网络节目单中不同的吸引子。

有了这个框架，个体发生学里的许多已知性质也就各归其所了。首先，每一个细胞类型都要被限制在基因活动的可能样式的一个极小的部分。只有这一种行为发生在那个有序的王国内。状态圈吸引子的长度是基因数的平方根；于是，有着 100000 种基因和 30000 种可能基因表达样式的人类基因体系应该安顿到一些个大约只有 317 种状态的状态圈并绕之旋转，那是可能的基因活



动样式的极小部分。有序王国的这些小小吸引子就构成免费的秩序。

细胞围绕其吸引子周旋所用的时间，从生物学上讲似乎是完全可以思议的。打开或关闭一个基因不过需要 1 分钟到 10 分钟。所以围绕状态圈周旋的时间不过是 317 分钟到 3170 分钟，或者说 5 小时到 50 小时——这正是细胞行为可能需要的时间范围！

实际上，细胞经历的最明显的周期也就是细胞分裂的周期本身。在全速发育的细菌，细胞周期大约为 20 分钟。肠道内壁上有一个区域叫做 Leberkuhn，衬在那里面的细胞的生命周期为 8 小时；你身体内的其他细胞大约需要 50 小时。所以，如果将细胞类型跟状态圈吸引子相对应，那么，就可以把细胞周期看作一个细胞穿越其状态圈的长度。而算出的结果，即细胞穿越其吸引子所用的时间，也就是细胞周期的实际时间。

一个每基因两指令的基因网络（ $K=2$ ），或者说一个充满疏导性作用的网络，不但表现出自发的秩序，而且这个秩序还跟见之于实际细胞的那种秩序相似。在第四章里我们讲到，在有着 100000 个基因的 $K=N$ 的网络里，一个状态圈上会有 10^{15000} 种状态。说到这里，你就能计算出，围绕一个状态圈吸引子走完轨道，一分钟走完一个状态转变的话，一共需要多长时间。从生物学的角度上说，还是忘了这回事吧。就是 $K=4$ 或 $K=5$ 这样的网络——这么大个儿的网络也早就处于混沌王国——其状态圈都已经长得荒乎其唐了。现在我们来考虑完全随机地构建的基因网络，所受的限制只有见之于实际基因网络中已知的那些约束：我们发现，那周期正好处于生物学棒球场的范围之内。

假如这一观点是对的，那么，细胞的周期就应该约等于基因数目的平方根。图 5.5 显示，对于自细菌到酵母菌到水螅到人这所有生物体来说，情况正是这样。这就是说，周期的平均值，应

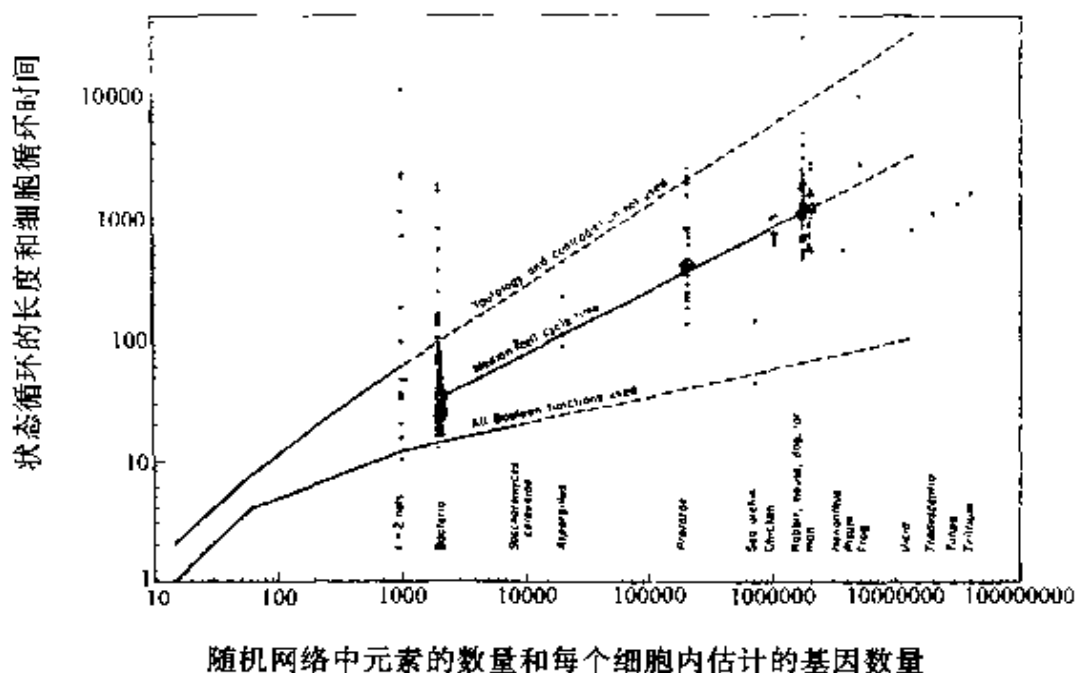


图 5.5 生物组织的法则？这里把某随机网络中元素的数量，和状态循环的长度的关系，以对数图表的形式表现出来；同时把对不同生物的估计的基因数量和每个细胞内含有 DNA 的比例，跟细胞的分裂时间的中间数相对比。在两种情况下，所得的结果都是斜率为 0.5 的直线。这正是平方根关系的特点。（图 5.4 所显示的第一个和最后一个布尔运算规则，同义反复和矛盾运算，在这个网络中不起作用。）

是该生物体内基因数平方根的函数。所以，对于一个细菌来说，细胞分裂的时间大约为 20 分钟，而人的细胞，因其每一细胞内 DNA 的数目为此数的 1000 倍，分裂时间则约为 22 小时到 24 小时。

在图 5.5 中我们看到，细胞周期的平均值的增加，约等于该生物体内基因数目的平方根，正如我们的假说所预言的那样。可是，图 5.5 也告诉我们，正像我们的模型也曾预言过的那样，中线上的分布可是严重偏斜的：大多数细胞，不管基因多复杂的细胞，其周期都很短，而有少数几个细胞，其周期却相当长。在每基因两指令的 $K=2$ 的基因网络模型中，也见到同样的偏斜。但我要提醒你：尽管关于细胞周期已经做了很多工作，我们还是知



之甚少，不能多说，只能说，理论与观察结果之间存在着有力的统计学一致性。

现在，我们将看到更多的这种一致性。生物体内细胞类型的数目，从细菌的 1 或 2 增加到酵母菌的 3，到简单的生物如水螅的约 13 到 15，到果蝇的约 60，到你我的 256。与此同时，从细菌到人类，基因数目也在增加。假如弄明白何以复杂程度不同的不同基因系统有着它们所拥有的细胞类型，那将是多么美妙呵。

假如一个细胞类型就是一个状态圈吸引子，那么，我们应能预言，细胞类型的数目是一个生物体内基因数的函数。在每基因指令数 $K=2$ 时，或者更一般地说，在那些疏导性网络里，状态圈吸引子的平均数大约只有基因数目的平方根之数。所以我们预言：人，既然有 100000 个基因，那就应该有大约 317 个细胞类型。而实际上，已知的人类细胞类型为 256 个。

假如我们的理论是对的，我们应能预言基因数跟基因类型数目之间的比例关系。后者应作为前者平方根的函数而增加。图 5.6 列出的数据确认了这一预言。 X 轴上所列为基因数， Y 轴所列为细胞类型数。细胞类型的确随基因数的平方根的增加而增加。

面对这个，是很难不动心的。这一理论，即关于基因系统应处于有序王国的理论，不但切题，而且恰中肯綮。为什么关于有序王国里平行处理的基因网络的基因行为的理论竟然能预言细胞类型与基因复杂性的比例关系，哪怕是大体上的比例关系，而且为什么预言的绝对值与观察结果如此接近？

如前所述，自我平衡，也就是各类细胞在受到扰乱之后仍保持原样的那种倾向，对于生命是至关重要的。取一有数千变量的布尔网络，使之安顿于一个状态圈吸引子。暂时地扰动任一模型基因的活动。对于几乎所有这样的扰动，该系统都会回到受扰乱之前的状态圈。这正是自我平衡，而它在有序王国里乃是免费自

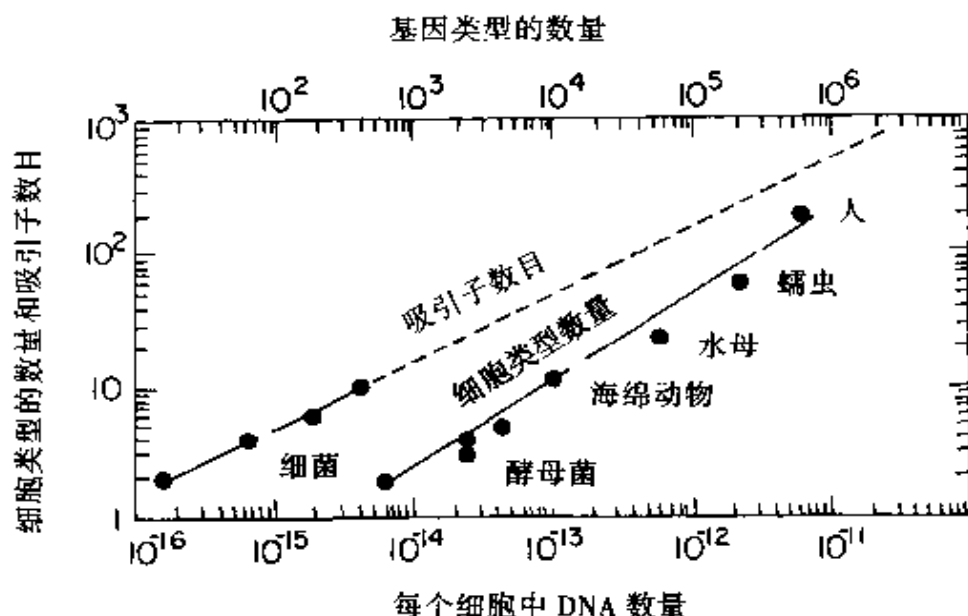


图 5.6 另一种优选法则。本图显示的是多种门的生物的细胞类型数,与每个细胞中 DNA 数量的对数的对比关系。我们再次发现,这种对数关系是线性的,斜率为 0.5,表明细胞类型的数量随每个细胞中 DNA 数量的平方根的增加而增加。假如结构性和控制性基因的数目与每个细胞内 DNA 内容存在比例关系,那么细胞的种类,与基因种类的平方根就存在函数关系,随着基因种类的增加而增加。

来的。

但是,自我平衡不可能是完全彻底的。假如受精卵通过分成枝状的路径分化成中间细胞类型,这些中间类型又进而分化为新生儿或成体的最后细胞类型,那么,一点混乱偶尔也会把一个细胞推入一个新的吸引区而流入新的吸引子,也就是循着新的发育路径成为一个新的细胞类型。比如,现已知道,在早期的胚胎里,外胚层里的细胞本来走在形成皮肤细胞的路径上,却因了某种分子触发器的感化,猛地一跳,跳到另一条道上,长成了神经细胞。另一方面,一个世纪的研究工作让我们得知,每一个细胞类型被触发的时候都只能改走相邻的有限几条路径。早期胚胎的外胚层细胞能从皮肤路径走上神经路径,但是却走不到成为胃壁衬层的路径上去做分泌盐酸的勾当。



仍考虑这个受精卵分裂和发送子细胞到下级分支路径去这幅图景，设想在每一岔路口都有两三个选择，最终创造出细胞类型的多样性来。就我们所知，所有的多细胞生物都是循着这样的分支路径做着分化的，自古至今，没有例外。那么，我们那些处于有序王国里的基因系统是否全都自然地表现出这些性质呢？答曰：是的，它们都这样。

对于大多数扰乱，任何吸引子上的基因系统都会表现出回归同一吸引子的自我平衡特性。细胞类型有着根本的稳定性。可是，对于某些扰乱，系统乃流入不同的吸引子。于是，分化自然发生。并且，更加关键的性质还在于：不管细胞类型来自哪一个吸引子，它只可能向着有限的几个邻近的吸引子转变，而其他的扰乱复又把系统从这些吸引子驱入更加不同的吸引子。看起来，每一个湖泊只跟少数几个湖泊相邻。外胚层上的一个细胞很容易就能撞入一个会让它长成视网膜细胞的吸引子，却很难撞入一个让它长成肠细胞的吸引区。

并没有经过进一步的选择，处于有序王国的基因网络自然而然地就具有一种性质，那种性质大约是 10 亿年来个体发生学的特色，这就是，细胞从合子沿岔路逐级分化，产生出成体的许多细胞类型。自然选择有没有为保住个体发生学的这一核心特色而奋力拼搏，一直拼搏了 10 亿年？难道这一特色由于有共同的世系而为所有多细胞生物所共享？或者，沿岔路逐级分化这一特色是如此深地植根于疏导性基因网络，以至于不管自然选择怎样筛选、都作为免费秩序的表达而光照万世？如果是这样，那么，选择可真的不是个体发生学里秩序的惟一来源了。

而且还有更多的证据。还记得不，在那有序王国里，“红色”的部件，就是那些要么僵死在活跃状态、要么僵死在不活跃状态的基因，构成了一个巨无霸集合，充斥于整个基因网络，只剩点点绿色的孤岛以复杂的样式闪闪烁烁。假如基因系统真的处



于有序王国，那就会出现这样一个僵死的部件和一些不冻结的孤岛。如果是这样，那么，很大一部分基因在人体各种细胞类型里都应处于同一活动状态。它们应该与那个“胶结的部件”相对应，横跨整个网络。实际上，据认为约有 70% 的基因作为一个共同的核心，同时活跃在哺乳动物的所有细胞类型中。差不多的数目也见之于植物。这些基因大概就是那个胶结的部件。

这里面更深远的含义是：只有一小部分基因决定着各种细胞的不同。据发现，一棵大约有 20000 个基因的植物，不同类型的细胞里面，表达基因类型差别的只有 1000 个，也就是 5%。这个数值很接近根据闪烁的不冻岛里的基因数而估计出来的部分。

最后，你想必还记得，在那有序王国里，扰乱一个基因的活动，只能波及整个网络里的一小部分基因。此外，没有任何基因能引起雪崩似的改变，波及成千上万的其他基因。实际上也正是这样。

最终理论之梦

1964 年我考入医学院。那时候，我就发现自己有一个梦。这个梦缘何而来，我不知道。那时候我初涉生物学，跟读者诸君中大多数人一样，对于其中丛林般的奇妙——历史偶然性啦，自然选择啦，设计论啦，漂流啦，事故啦，纯粹的惊奇啦，等等，等等，也是所知甚少。我觉得，作为一个年轻的科学家，我还不够测量自然选择的深浅；在随后的 30 年里，它的微妙是愈加令我难解了。可是那梦想，管他是从哪来的，我至今依然抱持着。如果生物学家忽略了自组织，那不是因为它不够普遍、不够深刻。那是因为，我们这些弄生物学的还不知道如何去思考那些同时受制于两个秩序起源的系统。可是，任管是谁，只要他见过雪花，



只要见过简单的油脂分子在水面上飘游，飘着飘着就形成了细胞一样的中空泡囊，只要见过，一窝子相互作用的分子终能成形为生命，只要见过联系成千上万个变量的网络能产生令人惊倒的免费秩序，他怎能不怀抱一个中心的思想：假如我们要获得一个关于生物学的最终理论，我们当然、当然要去理解自组织与选择的掺和。我们不得不看到，我们原是某种更深刻的秩序的自然表达。我们最终会在关于自己的创生之谜中发现，说来说去，我们到底还是预期的产儿。



第六章 诺亚方舟

当年，诺亚得到警告，说洪水就要来了，于是就伐佳木，造方舟，装载上所有的物种。但见它们每样两个，一公一母，列着队，庄严地从坚实的踏板登上方舟，以待大水来临。经书里告诉我们，拜上帝体仁爱物的隆恩，方舟从地上漂起，停在了亚拉腊山上。大水退了之后，又让他所造的活物出来，叫它们在地上生长兴旺。

假如真的有个诺亚对早期的生物圈作过头口普查，假如我们有什么法儿能走进他当时的寻找生物之所，我们想必会发现，自从 40 亿年前我们这个行星真正诞生以来，分子的种类和生物的种类真的是大大增加了。原行星形成之时，有机分子的种类想必非常之少。生命孕育之初，物种的数量想必也非常之少。

而今，在人类居住的每一平方英里土地上，都有数不清的有机分子在几百万种细胞内挨挨挤挤。没有人确切地知道，无机和有机的分子到底有多少种，可是有一点我们可以很有把握：生物圈里有机分子的多样性比起 40 亿年前第一批小小的分子在原初大气和海水里聚集起来的时候总要多多了。不知以怎样一种迄今仍然神秘莫测的手续，在这一旋转的地球上，多样的有机分子获得了能量——不知是从阳光里片片段段截取的呢，还是从雷电中一下子获得的——一番炖煮烹炒，从简单的原子和分子做出了我



们今天所见的复杂的有机分子。

我们一直在寻找迹象，希望能证实，生物圈里的秩序是由比自然选择单打独斗更深的律条塑造出来的。现在，我们正试图弄明白这一令人惊讶的分子多样性从何而来。很有可能，是分子多样性本身引起了自己的大爆炸！多样性以自己为食物，驱动自己向前。细胞彼此间相互作用，并且跟环境相互作用，创生了新型的分子，这些分子同样富有创造性，马上产生出更加多样的分子。这种我称之为超临界行为的事情，跟见之于分子转变为原初生命的那种态相转变同出一辙。

在链式核反应中，铀核的衰变产生了多种中子。每一个中子都可能与另一个铀核碰撞，从而大批地产生更多的中子，而这些中子复又轰击更多的核子。这种链式反应以自身为食物，中子产生更多中子，更多中子又产生更多更多的中子，直到成为那恶狠狠冲天而起的蘑菇云。在超临界的化学系统中，分子种类产生更多分子种类又产生更多更多的分子种类，直到那令人惊奇的分子之云接合成一切的一切，从三叶虫到火烈鸟。

我们这是在追逐大猎物，探寻复杂性的规律，探寻这个扩张的不平衡宇宙中那制约造物过程的规律；在这个宇宙中，充满了蜷缩起来的能量，一旦释放出来，就会形成星系、复杂分子和生命。我们已经看到过一些蛛丝马迹。在第三章里，我们探讨过一种可能性，那就是，足够多样的化学物质相互间发生反应，就能“起火”，从而达到催化闭合，突然间出现活的、能自我繁衍的、会进化的代谢系统。自动催化的系统可能作为免费秩序的一部分而成形。在第四章和第五章里，我们又在灯泡网络那令人吃惊的连贯动态秩序中、进而在分子自动催化网络中、在今天的细胞及其个体发生学中进一步找到了免费秩序的踪迹。小小的吸引子中的秩序掌握着分子系统的方向盘，引它们走向自身的一致。然而，无论是原生细胞，还是今天的细胞，都不能单独生存。细



胞活在复杂的群体中，这个群体一直在交换着每一细胞所创造的分子，并且还要一直交换下去。与此同时，我们窗外的生态环境——一般被看作是组成它的各种各样的物种——也是一个代谢的网络，也在创造并交换着它们的物品。本行星上的各生态环境连入一个化工厂——在茫茫宇宙中我们这疙瘩，它可能是最复杂的化工厂了。这是一盘大机器，通过它的运作，我们这一大块儿宇宙的不平衡过程得以膨胀：增加其分子形态的多样性，保证到处都是复杂和创生。

假如今天我们能大家一道，聚集起地上所有的畜类，水中所有的鱼类，那么，一共得有多少种生物，多少种较小的有机分子，多少种大一些的聚合体？没人知道。有人猜想，生物圈里的物种数目得上1亿。如果把我们一一放到分类学中应呆的地方，那么，昆虫的种数要多于所有脊椎动物种类的总和。又有多少种较小的分子呢？同样，没人知道，可我们还是有些迹可寻。时到如今，已有卷帙浩繁的有机分子索引编成。我的朋友大卫·瓦宁格（David Weininger）是日光化工的创始人，该公司用计算机做着很先进的有机分子结构分析工作。他告诉我，在全世界范围内，已经搞清楚结构的有机分子已有千万之数。这些化合物当中，有许多已经在制药厂和化工厂人工合成。但是，由于很可能存在这样的情况，就是在林林总总的生物体内，可能有种类非常多的较小分子永远也无法分离、定性，所以，可以明智地赌一把说，生物圈里自然发生的有机分子的种类，把我们的注意力局限于不超过100碳原子的尺码较小的分子，那么，这个数字很有可能在1000多万。

大分子多聚物的种类有多少呢？假如仅以蛋白质为限，我们还是可以作一粗略的估算。人类基因组，也就是你体内每一细胞里所含的基因，大约编码着100000种蛋白质。假如我们作一过分简单化的猜想，认为地球生物圈里那上亿个物种，每一种都产



生完全不同的蛋白，那么，生物圈里蛋白质的多样性将上到 100000×1000000000 ，也就是 10 万亿之数。当然，有亲缘关系的物种，其蛋白也是高度相似的。所以，这一估计不但很粗，而且有可能偏高。尽管如此，假如我们估计，生物圈包藏着 1 万亿种不同的蛋白质，那是不会很离谱的。

上千万种小有机分子和 1 万亿种蛋白质？40 亿年前我们这块地儿可没有这样的事。所有这些多样性都是从哪来的呢？

我们需要新的律条。就连那些有争议的候选律条也可能有所助益。在本章里，我将试图让你相信，确切地、毫不玄虚地说，整个生物圈可能就是一个集体自动催化的系统，集体地催化着、扩张着我们所见到的有机分子的多样性，有点像链式核反应。

可是，尽管整个生物圈是超临界的，像一团裂变中的原子核，但另一方面，组成生物圈的一个个细胞却是亚临界的；不然的话，假如细胞内部也搞起多样性大爆炸来，那可是要命的。我想让你相信，这正是创造的张力所在，是这种张力带来了生物圈中日愈增加的多样性。在这种张力里面，我们可能发现新的规律。我要探讨这样的可能性：是否正是这种张力，把细胞的群落驱赶到亚临界和超临界两个王国的中间地带，在那儿走钢丝搞平衡，又从而驱动着生物圈内新型分子的创生。

生物学大爆炸

假如生命是集体自动催化系统的成形，假如生命的催化闭合之火为化学反应图里的某种相态转变所煽动，那么，最初的生命已经是超临界的、已经是爆炸性的了。果如此，生命就一直在努力控制这一爆炸。

请回忆一下我们第三章里的那个玩具模型：地板上放 1 万只



纽扣，你坚持不懈地用线绳随机串连起一对又一对儿，不时地停下来，提溜起一只纽扣，看这一下提溜起多少只。你一定记得那种相态转变：当纽扣与线段之比超过了临界值 0.5 的时候，突然间，一个巨大的纽扣串，随机图表上的一个巨无霸部件形成了。当你拿起一个纽扣时，一下子竟然提溜起 8000 只纽扣。

这还算不上是超临界行为。线绳连接的不过是纽扣，串连纽扣这一行动本身并没有制造出更多的纽扣和线绳。可假如竟然做出了这种事呢？那样的话，纽扣和线绳会繁荣兴旺，长满地板，爬出窗外，野哄哄乱糟糟乌压压的枝叶把你的邻居都给憋死。

当然，纽扣和线绳是不会如此做怪的。可是，化学物质和化学反应却会。化学物质可以作为催化剂，作用于作基质的其他化学物质，造做出更多的化学生成物来。那些新的化学生成物又能催化更多的反应，牵连到自身和原来的分子，共同造作出更多更多的分子来。这些新增加的分子又会引起更多的新反应，跟自身反应，跟算作基质的旧有分子反应，而周围所有的分子又作着催化剂，催化着这些新的可能的反应。纽扣和线绳没有，可化学物质和反应却能溢出窗外，淹没邻居，创造生命，布满生物圈。

分子种类的爆炸就是我所说的超临界行为。超临界这一现象，在我们关于生命起源于集体自动催化系统的模型中已经存在了。还记得不，我们曾经通过思考多聚物，可能是较小的蛋白分子，可能是 RNA 分子，研究过这一问题。我们选择了这些分子，是因为这些分子能同时作反应里的基质和同一些反应的催化剂。这里的要害是：分子可以同时既作基质又作催化剂。

还记得吧，我们曾用一个非常简单的模型，来说明是哪些多聚物作为催化剂作用于哪些反应；我们说过，任何多聚物都有某种可能性，比如百万分之一的可能吧，作为催化剂对任何特定的反应发



生作用。当我们大锅里的分子多样性达到那个临界值的时候，各种分子催化了那么多不同的反应，以至于出现一个由催化反应组成的巨无霸网络。在那个巨无霸网络里面的，是一些集体的自动催化系统，也就是—些能自我维持的化学网络。

可是，这还不是故事的全部。真相的下一部分，我所知道而且要讲给各位的下一段故事，是这样的：这样的系统，其多样性还能继续膨胀，创生越来越多的分子种类，直至受到其他因素的限制，比如食物分子的供应，分子的浓度，能量的多寡有无，等等。这样的系统，至少在我们的电脑模拟里，是超临界的。

在关于生命起源乃是集体自动催化系统之成形的模型中，我们也看到过超临界行为：假如任一多聚物催化任一反应的可能性为百万分之一，而且系统中多聚物的多样性非常之低，那就没有或几乎没有什么反应被催化，没有新分子能够形成，那一阵分子创新的骚动会很快死灭。

研究这个过程有个捷径，就是设想向我们假设中的化学火锅里“加料”，不断地供给它简单的食物分子。还记得吧，在构建自动催化系统的时候，我们用过单体 A 和单体 B，还有四种可能的二聚物 AA、AB、BA 和 BB（图 3.7）。这些分子合起来，形成了更复杂的分子，而当其复杂性达到阈值时，自动催化系统从一团混乱里突地成形。要看看在哪一点上这个系统成了超临界的，只需要制造一起新分子爆炸案就成。你可以把那些“食物系统”的多样性“协调”到一定火候，使其包括所有可能的三聚物——AAA、AAB、ABB，等等等等——或所有的四聚物，五聚物，等等等等。另外，你可以调节一个概率，就是任一多聚物能作为催化剂作用于多聚物基质间任一可能的绑扎式反应或劈开式反应。图 6.1 显示的就是所发生的事情。x 轴上所标的，是最长的食物分子的长度——二聚物，三聚物，四聚物，等等，y 轴上标的，是任一多聚物能催化某一反应的可能性。

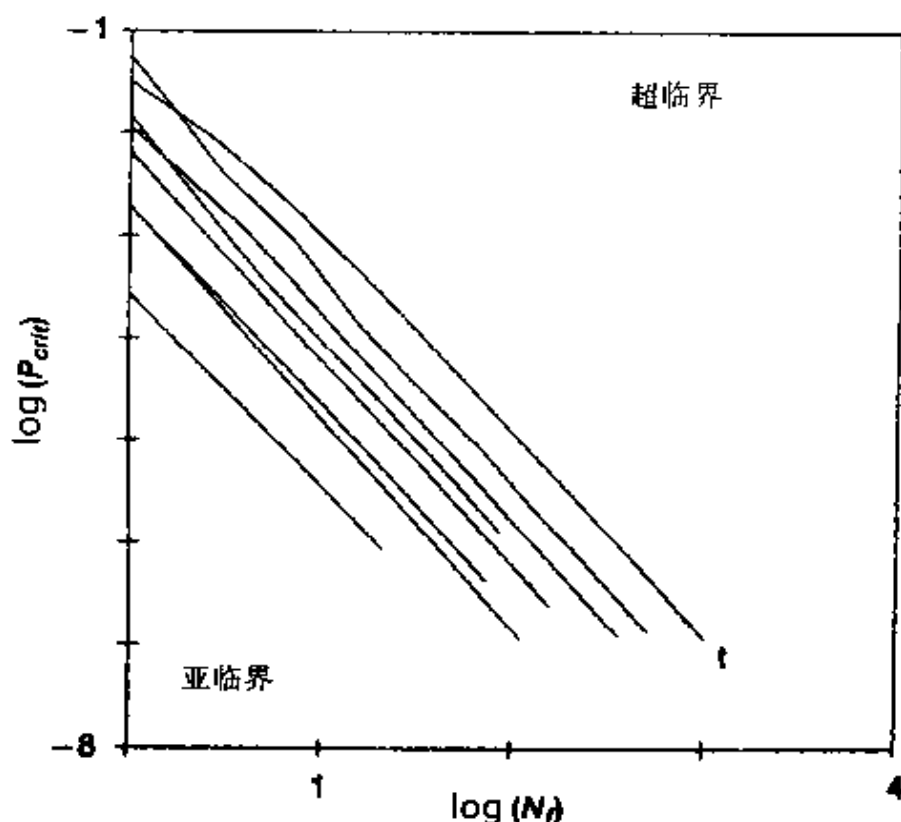


图 6.1 一例相态转换。本图显示的是一个自催化网络中，分子种类数和任何分子所催化的任何特定的化学反应的可能性之间的对数关系。 y 轴的顶部比底部的催化可能性更高。标有字母 t 的线段预测出相态转换的临界点，将更高的分子多样化和更高的催化可能性的超临界行为，和将更低的分子多样化和更低的催化可能性的亚临界行为分隔开。与 t 线段平行的其他线段，是应用包含 20 种单体的多聚物所作的数值仿真计算获得的。随着单体种类的增加，数字曲线相隔越来越远，但是和预计的曲线总是保持平行。

发生了什么，现已在你的意料之中了。图 6.1 中，一条相态转变之线划开了两个王国。催化的概率处低位时，或食物分子的多样性处低位时，或两者均低时，新型分子的产生便很快萎缩至无足道。行为是亚临界的。相反，当催化的概率足够高，或食物分子多样性足够高，或两者均高时，系统的行为就是超临界的——爆炸性地产生新型分子，这些新型分子复又催化了更多更新型的分子的形成，它们又生出更新型的分子。在这里，我们的化学纽扣和化学线绳生出了无穷无尽的纽扣和线绳。



超临界汤

谈论超临界反应系统如何爆炸开来，飞入化学创造性的外层空间，但仅仅局限于电脑模型，这是一回事；而测度在一个真实的化学系统里，发生爆炸之后还会发生什么，那又是另一回事。我们且放下前面的话题，开始做一道超临界的汤——充满了水分，也充满了沟沟坎坎，其多样性为坎贝尔们所不敢梦见。假如我们能够在一大缸里做出这道汤，你会打赌，大自然有那么多时间，大可优哉游哉做得更好。记住，我们可是在追寻制约生物圈里分子多样性和复杂性大爆炸的那些规律呵。

言归正传。要做那道汤，先要想一想，该把哪些分子放进缸里，而这些分子又可能发生哪些反应。我们需要一组催化剂来加快这些反应，让每一种催化剂都有某个概率去催化任一特定的反应。然后，我们就可以自问：我希望我真正的分子汤是超临界的还是亚临界的。

第一步要考虑，我们按菜谱做的东西到底能产生多少种分子和反应。实际上这是个非常困难的问题。有机分子并不那么简单，净是些直条的原子链条。它们常常有复杂的结构，有枝枝杈杈和相互连结的圈圈儿。一个分子的化学公式，也就是分子式，是列出每一种原子的拷贝数。例如， $C_5H_{12}O_4S$ 有 5 个碳原子，12 个氢原子，4 个氧原子，还有 1 个硫原子。可是，从这个化学公式，很难说能做出多少种分子来。但至少我们有把握说：随着一个分子里原子数目的增多，可能的分子的数目会急剧地增多。如果我要你用比如说总共 100 个原子，其中有碳、氮、氧、氢和硫，做出所有可能的分子来，你得发疯似地开列出种种的可能性。那又会是一个天文数字。

要计算可能发生多少种化学反应同样不易，这是根据量子力



学和化学定律就可以想见的。一般来讲，我们可以想到，有些反应里，某种基质变成某种生成物，或者两种基质结合，形成一种生成物，或者一种基质破开，形成两种生成物，或者两种基质交换原子，形成两种新的生成物。两基质、两生成物的反应非常普遍，一般是一个分子打掉一个或多个原子，让它们去链接第二个分子。

尽管我们不知道一个复杂的分子系统内实际能发生多少种反应，我还是想作一粗略的估计，以便推进我们的论证。我要说，对于任何两个不太复杂的有机分子来说，至少有一种两基质、两生成物的反应是当然的。这估计当然偏于保守。且说第二章里讨论过的那些较小的核苷酸（称作低聚核苷酸），CCCCCCC 和 GGGGGGG，每个分子有 7 个核苷。这两种分子，哪一种都能被打开，其“右端”互相交换，生出两种新的分子，比如 CC-CGGGG 和 GGGCCCC。由于每一分子有 6 条键，那么，在这两种基质之间，就可能发生 36 种、而不是只有 1 种两基质、两生成物的反应。

假如每一对儿不太复杂的有机分子都能发生至少 1 种两基质、两生成物的反应，那么，某种分子种类复杂的混合物里面可能发生的反应的数目，就至少等于有机分子对儿的数目。如此，假如混合物里有 100 种有机分子，分子对儿的数目也不过是 100×100 ，或者说 10000。

重要的是：假如分子种类的数目是 N ，那么，反应种类的数目就是 N 的平方。 N 增加时， N 的平方急剧地增加。假如混合物里有 10000 种分子，它们之间就会发生 1 亿种两基质、两生成物的反应！

最后，假设我们想用蛋白质作我们的候选酶。那样的话，我们就需要想想这么一种可能：就是每一种酶都会催化任一种可能的反应。假如我们要做一道真正的超临界汤，看起来，明智的办



法最好是用抗体分子来做候选酶。这个选择还不是顶要紧的。假如我们选用其他蛋白质作催化剂，我要描述的所有东西也都应该站得住脚。不过，在这一点上，未来的超临界溶液可以利用那个令人惊奇的事实，那就是：那些进化出来以便消灭入侵者的抗体分子是能够催化反应的。会做这种事的抗体分子叫做催化性抗体，或称抗酶（abzymes）。制作抗酶的实验手续是这样的：找到能够连接处于转变状态的反应的抗体分子。那时你会发现，几乎十分之一的抗体都能催化那个反应。关于抗酶的资料现已表明，一个随机挑选的抗体分子能催化一种随机挑选的反应的概率大约是百万分之一。假如我们猜想，这概率在百万分之一到十亿分之一，那将是相当保险的。

现在，我们已经万事俱备，可以动手做那缸超临界汤了。设想在某种合适的容器里有那么个反应系统。一方面变换有机分子的种类的数目，另一方面，变换抗体分子种类的数目。把抗体的多样性标在 x 轴上，而把有机分子的多样性标在 y 轴上（图 6.2）。现在设想，在这一坐标系的最初阶段，反应系统中有两个有机分子和一个抗体分子的时候，会发生什么事情。抗体催化任一反应的机会大约是十亿分之一。四种反应中，任一种被催化的机会几乎为 0。所以，形成新分子的反应几乎一定是没被催化的。我们的汤的行为是亚临界的。那道汤像你喝的鸡汤一样死气沉沉。

如果不是这样，若设系统里有 10000 种有机分子，另有 100 万种抗体分子。那样的话，就会有 10000×10000 或一亿种反应。那 100 万种抗体分子，每一种都可能催化那一亿种反应中的任一种。任一抗体催化任一反应的机会，再一次设想它是十亿分之一。这样，可望被抗体所催化的反应数，就应该是反应数乘以候选催化剂的种数，除以任一特定催化剂催化任一特定反应的概率。结果，可望被催化的反应数为 100000。

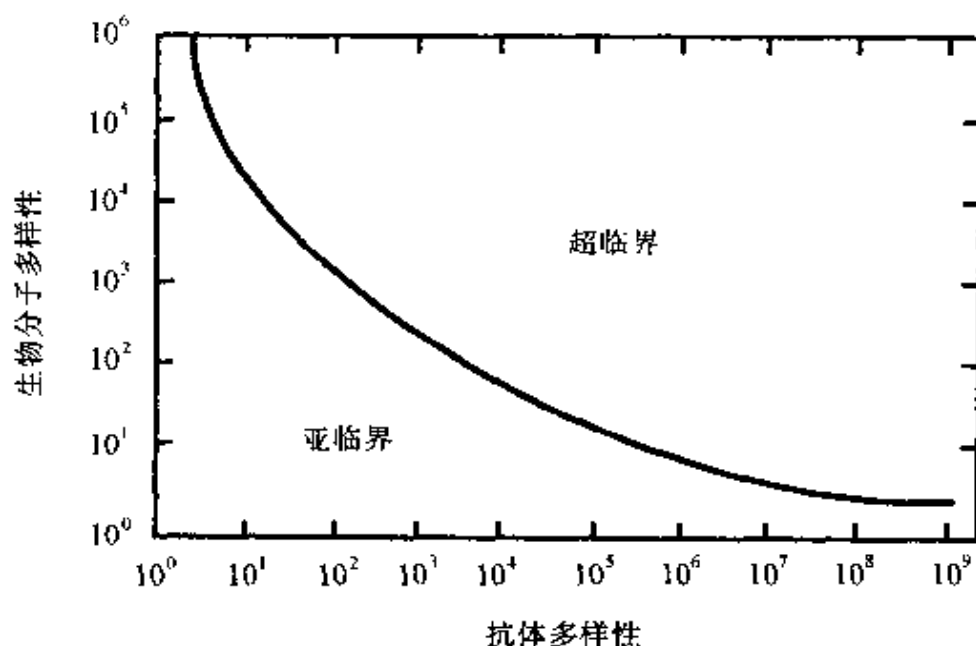


图 6.2 炖一锅超临界之汤。该对数图表示的是抗体(作为备选的催化剂)的多样性, 和生物分子的多样性(作为基质或者产品)之间的对数关系。图中的曲线表示的是超临界和亚临界状态之间的相态转换曲线, 曲线的上面是超临界状态, 下面是亚临界状态。

假如系统中有催化 100000 种反应的催化剂, 那么, 最初的 10000 种有机分子就会很快卷入大约 100000 种反应。常识告诉我们, 这些反应的大多数生成物将会是全新的。这样, 系统中的有机分子多样性将会迅速膨胀, 从 10000 扩张到上了 100000。

系统一旦着起火来, 它的多样性就会继续膨胀下去。第一轮催化反应大约产生 100000 种分子。可是, 有这一膨胀, 可能发生的反应的数目就爆炸成 100000 的平方, 产生出 100 亿种可能的反应来! 还是那 100 万种抗体分子, 现在成了催化所有这些反应的候选者, 而大约有 1000 万种反应将找到抗体催化剂。于是, 下一轮催化反应里, 大约有 1000 万种新的分子将被创生。最初的 10000 种膨胀了 1000 倍, 而且这个过程还要继续, 分子的多样性将如雨后的蘑菇。这样的多样性膨胀就是超临界的。

稍微想一想, 就已经很明显, 在我们的笛卡儿 xy 坐标系



中，有一些曲线把亚临界行为跟超临界行为划开了界限（图 6.2）。当有机分子很少、抗体分子也很少的时候，系统是亚临界的。可是，假如抗体分子的种类控制在某一较低数目，比如 1000 种，而有机分子的种类却增加了，最终在这些有机分子间将会有如此多可能的反应，以至于那 1000 种抗体分子将催化一些反应，那些反应将导致有机分子多样化的超临界大爆炸。同样，假如有机分子的数目被固定住，比如固定在 500 种，但抗体分子的多样性增加了，最终还是会达到某种多样性，致使抗体分子会催化一些反应，那些反应会导致某种超临界大爆炸。不言而喻，在 xy 坐标系中，那条关键的曲线大致如图 6.2 所示。在有机分子和抗体的多样性低于这条关键线时，系统就是亚临界的；如果有机分子和抗体分子的多样性高于这一曲线，系统就是超临界的。

超临界汤。一道营养丰富的蔬菜通心粉汤。

有越来越多的理由设想，如果真正的化学反应系统能够是超临界的，这里面就包含一种可能性：生物圈本身就是超临界的。我们下一步就要探讨这种可能性，因为我相信，生物圈里分子多样性的最终源泉就是超临界。可是，一方面，是细胞造成了、窝藏了超临界，并且由超临界来维持，另一方面，又正是这个超临界对细胞构成最深刻的威胁，可还必须在这个威胁下活下来。如果生物圈是超临界的，那么，细胞会保护自身不受超临界所蕴含的分子混沌的伤害吗？那答案，我想是这样的：细胞是亚临界的，也一直是亚临界的。可是，如果是这样，我们就需要解释，一个超临界的生物圈怎么会由一些亚临界的细胞组成呢？我们在寻找大块头猎物的时候，可能已经走上了发现生物学新定律之路。



诺亚试验

曾经有那么一天，你在吃晚饭。动作熟悉得不能再熟悉了，刀叉筷子，急了用手，我们取起食物，送往口中，咀嚼，咽下。吃下的食物被消化过程分化瓦解，成为简单的小分子，然后吸收，再做成我们自身的各种复杂分子。为什么要这么不厌其烦地用这种形式取得物质和能量呢？为什么不直截了当些，走到卷心菜叶子跟前，叫一声“成为我的！”，于是就跟它融合呢？为什么不直截了当些，让我们的细胞跟凉拌菠菜的细胞直接融合，把它们的代谢健康跟我们的相混呢？一句话，为什么不厌其烦，苦心摸索那没有把握的消化，去分化瓦解一些分子，仅仅为了再造一些？我们吃饭，而不是跟它们融合，这件事我认为值得深思。生物圈本身是超临界的，而我们的细胞却恰恰是亚临界的。假如我们跟色拉融合，那么，这种融合会在我们细胞内造成分子多样性，释放出大洪水般的超临界大爆炸。新奇分子的爆炸性增加很快就会要了那些可怜的细胞的小命儿。我们吃饭这件事并不是偶然的。造化大约是试了好多种途径才想出了这么个办法得到新的分子，让它们进入我们的代谢之网。我疑心，进食和消化，反映了我们保护自身，不受超临界分子多样性伤害的需要。

现在到了做思想实验的时候了。这个思想实验就是诺亚方舟试验。每样生物：苍蝇，跳蚤，香豌豆，青苔，鳕鱼，每样两个，个头大小，多少规格化一下；加入各种蕨类的叶子；每样叶子对入一小铲河马原料。1亿种生物，都是成双成对。然后，请最有训练、最高明的生化专家，把所有的东西搅拌均匀和。工具嘛，不用很复杂，一杆棒槌就成。捣烂磨碎，簸掉细胞膜，簸掉细胞内的细胞器膜，释放出每种生物里的饱和液汁，让它跟所有生物液汁充分混合。



会发生什么事呢？上千万种小的有机分子会跟 1 万来亿种蛋白相混合，一切一切都在一道营养丰富的汤里，成双成对爱抚在一起。光是那 1000 万种有机分子就可能发生 100 万亿种反应！而那 1 万亿种蛋白，哪样不是造化精工锻造而成，要它们在某种细胞里起特别作用的？现在也是无孔不入，见缝就钻。每一样蛋白，好像冥冥中注定，都有些坑坑洼洼，褶褶皱皱，这些不平之处，就像抗体库里所有成员都有的分子锁一样，都可能跟那 100 万亿种可能反应中的一种或多种反应的转型状态相连接。假设任一蛋白有一个键接地址使那个蛋白能作为催化剂作用于任一随机选择的反应的几率，甚至还低于十亿分之一，比如说竟是一万亿分之一。这样的话，有多少种反应会被催化呢？100 万亿种反应，乘以 10 万亿种蛋白，除以 1 万亿，哦，是 10^{15} ，这比系统中可能的反应的总数还要多。实际上，那 100 万亿种反应中的每一种，都会找到 10 种蛋白催化剂！从开始时的 1000 万种有机分子里，会闹出 100 万亿种生成物来。这样的多样性大爆炸会像链式核反应那样，把诺亚的方舟撞击得叫苦连天，不知所措，最后四壁炸飞了事。

我们的估计可能是错的，错得很离谱（错了 10 的多少次幂），但我们的泛泛的结论还会是成立：生物圈就是超临界的。我相信，这个超临界，乃是从最早的生命形式装点了大地开始直到今天的分子多样性和复杂性膨胀的最终根本。假如地球是超临界的，那么，这一点必定是复杂性原理的启示——启示我们，这个不平衡的宇宙如何创造生命，最终做出了我们。

但是，假如整个生物圈就是超临界的，那么细胞呢？在这样一个爆炸性的世界里，它们如何幸存，如何挺住不死并且进化呢？

想想一个人类细胞，比如肝细胞吧。人类基因组中，大约编码了 100000 种蛋白。没有哪一种细胞能一下子表达所有这些蛋

白，可是，就假设你的肝细胞它能。如果你看看代谢图，比如图 6.3，你会看到大约 700 到 1000 种小有机分子开列在内。这些小分子历经多种多样的反应，那是构成细胞代谢的交通车辆。现在，要紧的是，你的肝细胞里的蛋白已经参与了催化必要的反应，而没有参与那些不需要的副反应。尽管如此，如前所述，肝

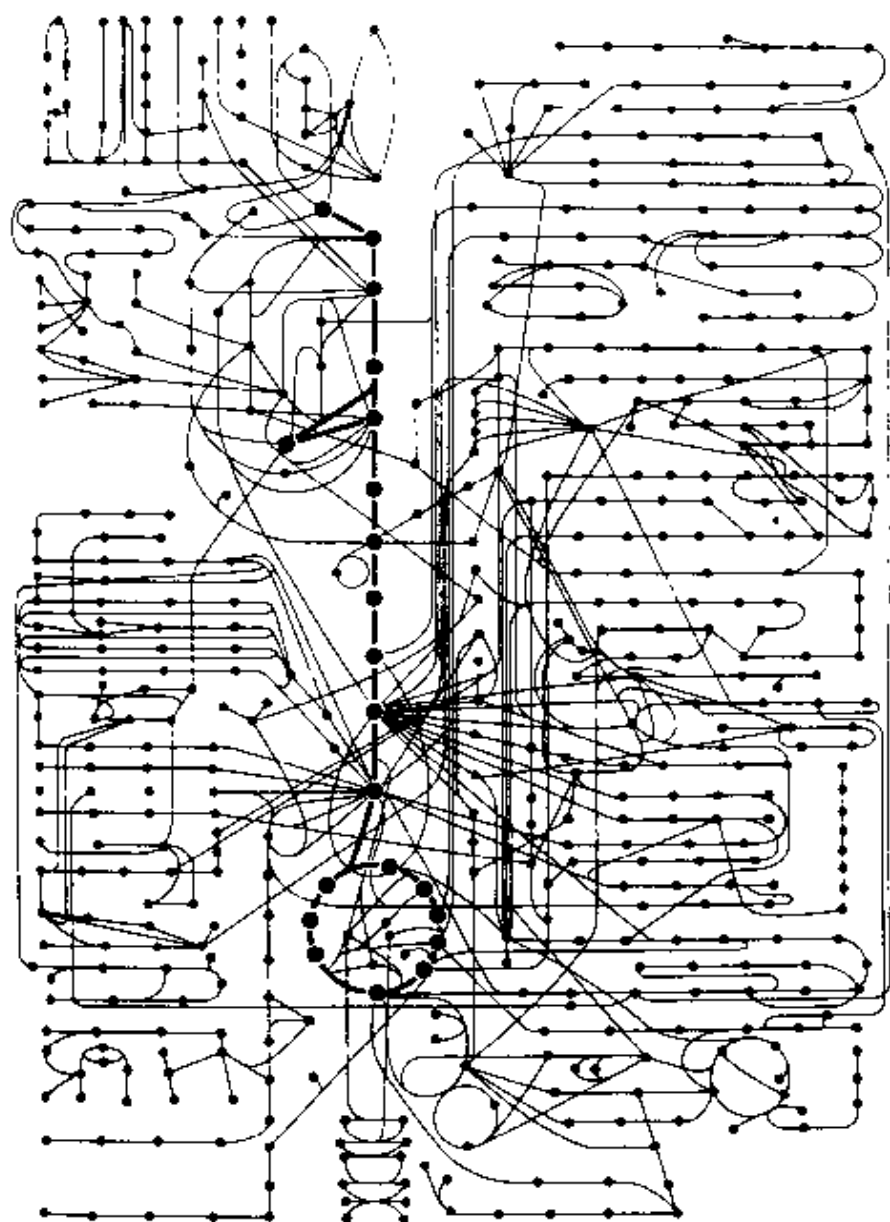


图 6.3 细胞交通图。本图所展示的是人体内代谢的中间过程，其中大约有 700 个小型细胞相互作用。图中的节点表示的是代谢，而连线表示的是化学转换。



细胞里 100000 种蛋白里的每一种都有一些沟沟坎坎，会跟新的转型态相连接而催化新的反应。

不妨设想一个新的试验。获取一个新的有机分子，称它为 Q。把 Q 注射进准备好的肝细胞。会发生什么事呢？好吧，让我们承认，那 1000 种有机分子中的每一种都可能跟 Q 一起形成一个两基质反应中的一员。这样，让我们猜想，Q 的注入，产生了大约 1000 种新的反应。保守一些，让我们猜想，你那 100000 种蛋白的任一种催化任一新的反应的概率为十亿分之一。那样的话，有多少种反应能找到催化剂呢？答案跟从前一样，是由反应数乘以候选酶数、除以催化概率给出的。那就是 $1000 \times 100000 / 1000000000 = 0.1$ 。简言之，涉及 Q 的 1000 种反应中的任一种被某种蛋白催化的机会只有 1/10。这意味着，你的肝脏实际上是亚临界的。似乎凭直觉就能看出，将 Q 注入细胞，并没有引发雪崩似的反应，产生出新的分子。Q 不大可能形成新的生成物。就算它当真形成了这样的生成物，比如 R，那么，R 同样不大可能产生什么反应，能被催化而形成更新的分子 S。Q 就算有什么效应，那也很快就会撒了气。

的确，这个直觉是不错的。有个叫做分支过程的数学理论表明，假如一个亲体期待的后裔数超过了 1.0，就可以预期，世系会分支，其多样性会无限地增加。假如期待的后裔数小于 1.0，那么，世系就会消亡（核爆炸里的链式反应正是一个中子一次撞击铀核所产生的子中子数超过了 1.0 所致）。由于亲体分子 Q 的期待后裔数只有 0.1，比 1.0 差得远，我们粗略估算即可知道，我们的肝细胞是亚临界的。

我们应不应该相信这一没开封的结论的细节？没那回事。这一简单公式里混进了太多的粗略猜想。我并不真的知道 Q 的注射到底产生了多少种新反应，也不知道我们的任一细胞实际上提供多少种蛋白和其他候选酶。更挑剔地说，没有人知道肝细胞里一



个随机选择的蛋白实际上有多大的概率催化一随机挑选的反应。那概率没准儿很高，比如说 100000 分之一，或者很低，比如说万亿分之一。可是，不管怎样，这个粗略的估算已经足以表明：假如整个生物圈是超临界的，那么，细胞极有可能处于亚临界与超临界的界线之下。

假如细胞真是亚临界的，这必定是一个极端重要的事实。它必定是我们正在寻找的生物学规律的候选者。假定细胞实际上竟是超临界的，那么，新分子 Q 的注入将会引发瀑布般的分子创新：Q，R，S，没完没了。那个瀑布将会传播蔓延，因为每一新的分子又会产生新反应，创生出更新的分子。几乎必然地，许多这样的新分子会瓦解细胞内分子协调的自我平衡，导致细胞的死亡。简言之，细胞内的超临界很快就会要自己的命。要想保护自己，细胞会进化出什么措施呢？它们会运用精工制作的膜来排除所有“异己”分子，要么，它们会发展一套免疫系统。可是，最简单的防御手段，当然还是保持亚临界。

我们可能正在发现一条普适于生物学的新定律：假如我们的细胞是亚临界的，那么，可以想见，所有的细胞——细菌，欧洲蕨，鸟类，人，所有这些生物的细胞都会是亚临界的。贯穿整个生物圈的超临界爆炸，自从古生代的细胞开始，从第一个细胞开始，从 34.5 亿年前的细胞开始，就必然一直是保持亚临界的。假如是这样，那么，这个亚临界—超临界分界线必定一直确定着一个细胞内所能窝藏的分子多样性的上限。这么说，细胞内存在某种分子复杂性的限制。

然而，话又说回来，尽管每一个细胞之内是亚临界的，它们却相互作用，形成一些群落，使得整个地球成为超临界的，轻盈灵活地上升，造成窗外的分子多样性。这一微妙的平衡到底是怎样发生的？现在我们就转而问这个问题：既然细胞是亚临界的，由细胞驱动的生物圈又怎么会成为超临界的。个中答案可能



是：细胞群落可能会进化到亚临界 - 超临界之间的分界线，到此而止。

创新的雪崩

我们不是独自生活的。我说的不是我们在这个日愈拥挤的地球上熙熙攘攘这件事。我指的是我们的肠子。你进食的时候，满动物园的单细胞生物，最幸福的是细菌，在你的肠子里繁生滋长。切不可小视这些东西。因为它们的代谢活动对我们的健康是至关重要的。这些细菌和其他活物形成一些小小的生态系统。但还是有许多彼此相对隔离的生态系统，从萦绕于海底地热喷口周围的群落，到远在冰岛僻处的温泉的边缘上蜷伏而生的群落，直到模拟着形成古 *stromatoliths* 复杂的细菌和海藻群落。

肠子里或别的什么地方的局部地区的某个生态系统能否是超临界的？如果是，那么，那个生态系统本身就能够产生分子多样性的大爆炸。让我们重新解释图 6.2，该图中，抗体分子多样性标在 x 轴上，而强行加入群落的新分子标在 y 轴上（图 6.4）。随着细菌种类多样性的增加，生态系统中多聚体的总体多样性亦在增加。同样，在 y 轴上，我们可以考虑把越来越多的新分子增加到生态系统中来。

会发生什么事情呢？想一想我们的老友 Q 吧。假如 Q 悄悄地生长进某种细胞，它要么会老老实实待在细胞里，要么会被细胞吐出，而那个细胞则丝毫没变。要么， Q 还会经历某种反应，形成新的分子 R 。 R 可能会老老实实待在细胞里，也可能被那个细胞吐出或释放。但是，此后 R 又会做什么呢？假如它被吐出，它就会找到门路，进入其他什么细胞，没准儿是另一类细菌。而这个故事又会重复，因为 R 可能会造成 S 的形成。

再想想图 6.4。给一系列越来越多样的细菌生态系统强加一

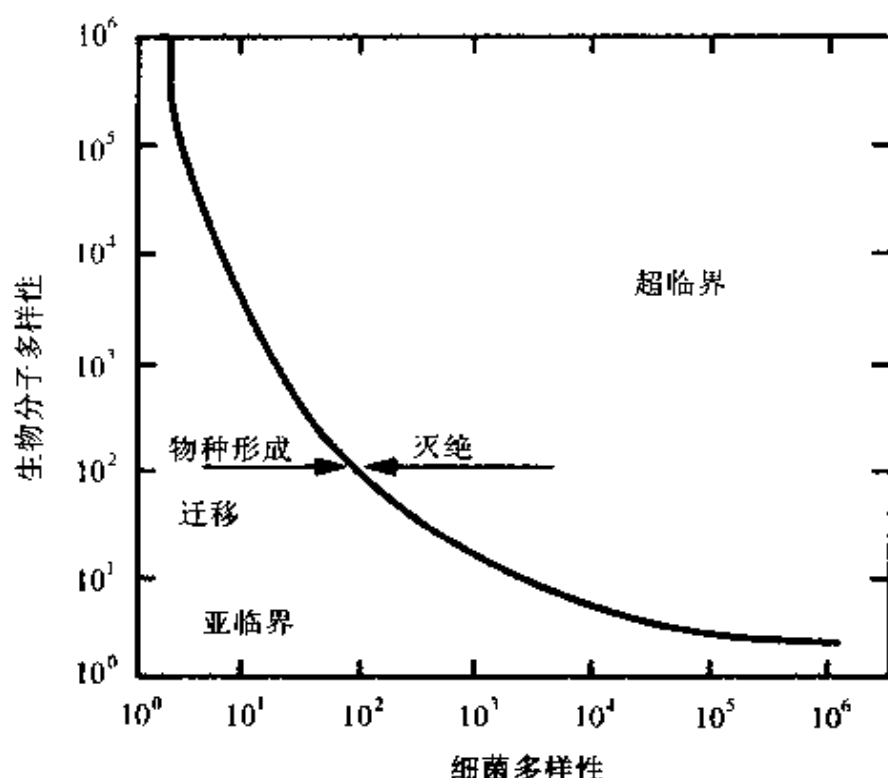


图 6.4 超临界爆炸。该图表示的是某个假想的细菌生态系统中物种的多样性和外部加入的生物分子多样性之间的对比关系。这里也存在一条曲线，将超临界行为和亚临界行为分隔开。指向相态转换曲线的箭头表示的是该假想生态系统的多样性，通过进化接近了相态转换曲线。

个固定水平的外源新分子。在某个多样性临界值上或高于这个临界值时，你会期待，这个生态系统作为一个整体将会是超临界的。分子创新将会被细胞群落放大。要么相反，把分子种类控制在低水平，但增加外来新分子的多样性。在某种分子多样性临界值或高于那个临界值时，该生态系统又该成为超临界的了。所以，又一次，某种曲线会把亚临界和超临界两个王国划开。

长话短说。把多种多样的细胞塞到一起，我们就可以模仿诺亚方舟试验，只不过有了细胞膜，故事的进展就要放慢一些。从细胞到细胞，分子会旅行、相遇、变形。从细胞到细胞，分子会创作自己转变的故事，而利用细胞的机制来加速故事的进展。酶只能认可有机化学。生物圈里的超临界爆炸在化学的综合性质中



是无处不在的，由生命本身推向前进，那是超临界的最圆满的胜利。

然而已经清楚，每一个生态系统都必须多多少少在这个爆炸倾向上放慢脚步。膨胀的分子多样性对于生态系统中的成员将会是有毒的。我们指望发生什么事呢？能不能恰好搞到点子上，在亚临界和超临界之间达成某种新的平衡，某种妥协？

假设那个小小的生态系统碰巧是超临界的。有些背运的细菌品种将不幸而有能力把撞上它的新型分子转变成一种要命的内毒素。这种毒素会杀死那个细胞。人们一定得想到，那样一来，生态系统中所有同类的菌细胞都将灭绝，上了细菌的天堂。这一惨重的损失，这种细菌灭绝，将产生一个简单的后果：它将降低那个生态系统现存的品种多样性。由于群落是超临界的，各种各样的新奇分子会坚持不懈地形成，可是，这又会驱动那个生态系统中一系列这样的多样性从超临界王国走向亚临界王国（图 6.4）。

假如不然，假如那个生态系统是亚临界的。细菌的品类太少，寥寥数种在那儿和谐地进行着代谢交换，互利共生，还有一点小小不然的竞争。它们在代谢的舞台上游荡，创造出许多新奇的分子。可是，忽而从舞台的左手，出场了一连串的移民品种，是从大路那边过来的陌生人。更糟的是，有些年高居久的大佬，厌倦了祖上遗传的老一套，一遇到那些不着调的随机突变和遗传漂移，就给你进化出大个儿的多聚物——DNA，RNA，还有会催化新反应的蛋白。这种持之以恒的移民和物种形成，增加了生态系统中细菌种类的多样性，驱使生态系统从亚临界王国走向超临界王国（图 6.4）。

于是我们有了一个候选的生物学定律。两个压力，一个迫使系统从超临界王国走向亚临界王国，另一个迫使系统从亚临界王国走向超临界王国。这两个压力可能达成折中，在亚临界王国跟



超临界王国的边界上停下脚步。这一想法显然是有诱惑力的。你禁不住要纳闷儿：区域性的生态系统会不会演进到这个亚临界—超临界的交界，到了以后就若危若安地呆下去，在两个压力之间平衡求存。生态系统竟会演进到亚临界与超临界的边界！

由此还得出进一步的结论：一方面，每一个生态系统都处在亚临界—超临界之间，可是，不同的生态系统之间还是会交换物品，共同营造一个超临界的生物圈，这个生物圈别无选择，只能坚定无情地向着更加复杂的境地迈进。

假如这些假说是对的，那么，生物圈的行为就可比之于核反应，而不像是核爆炸。在核爆炸中，链式反应因自动催化而失去控制。但在核反应中，有碳棒吸收掉过量的中子，确保链式反应的分支概率停留于或低于临界值 1.0。获得的是有用的能量，而不是大规模的爆炸。假如区域性的生态系统演进到亚临界—超临界之间的边界，那么，分子创新分支的概率就应当接近 1.0，导致大大小小的分子创新之喷涌或雪崩。临界值上的分支过程产生一种遵从能量分配律的雪崩，像从前我们在佩尔·巴克、唐超和科特·韦森费尔德的沙堆模型中遇见过的情景一样。不过，这些创新的雪崩会像受控核反应一样，最终归于死灭。下一次雪崩，不管是大是小，都将被下一个波动所触发，那个波动会产生新型分子 Q。像沙堆上的一粒沙子一样，尽管每一粒都可能触发一场或大或小的雪崩，但那个若危若安的生态系统将会制造大大小小的新分子类型的喷发。

假如这个想法是对的，那么，若危若安的生物圈就是在以分子多样性受控生发的方式慢慢地爬升，而不是动辄来一番大爆炸。假如生物圈是那个诺亚方舟试验，所有的细胞膜都破坏掉，那就会发生猛烈的爆炸。是细胞膜阻断了分子间许许多多的相互作用，从而阻断了超临界的爆炸，恰似反应堆里的碳棒吸收中子而阻断中子对核子的碰撞，不让它发生超临界的链式反应。



那么，现在我们是不是已经知道，区域性的生态系统会演进到那个亚临界—超临界的边界了吗？不，我们还不知道。那像个真实的故事吗？我觉得是，但还是要有些告诫。比如，我们还没有想清楚下面的这个事实：当分子多样性在超临界系统中发生爆炸的时候，生成物的浓度可能降低，使随后的反应速度放慢。浓度效应当然是重要的，但不大可能改变基本的结论。我们能用一些现代工具，比如质量光谱学等等来验证这个假说吗？我觉得能。

假如是这样的呢？假如区域性生态系统的代谢方式若危若安地处于亚临界与超临界之间，而整个生物圈却是超临界的呢？那样的话，我们有怎样的一个新故事好讲呵：关于生命间怎样互相合作、产生更新的分子类型；关于那个生物圈，其中，区域性生态系统摇摆于边缘上，但通过集体协作，其总体多样性便能缓慢爬升，因为这整个星球就具有超临界的品质。整个生物圈总的来讲是集体地自动催化的，催化着自身的维系，催化着持续的分子形态探索。我们的故事，讲的是生物圈集体地催化一个长久的驱动，驱动着自己向着分子的日益多样化、复杂化前进；讲的是细胞复制着自己的催化活动，不管催化的结果是福是祸，总是被迫地向前，不是转变，就是死亡，转变又死亡。像在沙堆的例子中一样，行动者永远不会知道自己的下一步，自己的最新试验，结果会怎样，是触发一个小小的分子改变呢，还是一场吞噬一切的大雪崩——那雪崩可能引起大创生，也可能引起大绝灭。

我们的故事，讲的是细胞，是生命形式，它们永远地全装贯带，在局部地区做好自己的事，永远是高水平的发挥。我们的故事，讲的是微不足道的小聪明：每一头生物都努力进化，却不可避免地为自己的最终灭亡创造着条件。

我们，在自己的家里，在自己生存的短暂时光里，牛气也好，烦恼也好，都是一场活话剧的参加者，都是历史中的一瞬，是反复上演的一折戏：诺亚大点名。



第七章 | 应许之地

我们有很多名字指称自己：Homo sapiens（智人）^①，Homo habilis（能人，制造工具的人），还有一个或许更适当的名目，叫做Homo ludens（游戏的人）。这是关于人的面面观，每一面都为科学做出了贡献。不存在一条惟一的道路，因为我们对世界的探索有赖于所有这三条道路：黑暗中摸索，我们需要智慧；要得到答案，我们需要技巧；然而，在探索活动的底层，我们永远永远离不开顽皮。“理论是心智的自由创造，”爱因斯坦如是说。说到爱氏本人，他的智慧和技巧我们是望尘莫及，但是，从根本上说，这个人乃是个顶顶洒脱的大顽主。

是这块儿关于“游戏的人”的科学，表达出了人类内里最宝贵的东西：创造性。在这里，科学就是艺术。追寻规律，是多么荣耀、多么乐趣呵。爱因斯坦追寻的是那个古老的规律。我们，尽管比起他来自属二流，但希望并不稍减。而且，有时候，从事科学研究的那种游戏之乐，竟然会带来意想不到的好消息：过了西奈山，有一片应许之地——有些技术会改变我们的生活

① 智人(Homo sapiens)，灵长目人科动物，俗名现代人。生存时代为从更新世晚期到全新世，分布于全世界。现代人有比尼安德特人更高、更细长的骨，更突出的下巴和更圆弯的额。他们的齿相似，而门牙却没有那么凸出。现代人能够制作各种用途的工具。——译者注



方式。

不管是经过了周密计划的，还是意外的事件，反正我们正在跨越人类历史上的新的门槛儿。“跨越”这个词儿还是往保守里说。岂但是跨越；我们正在一大片人所未道的应许之地上竞逐，或许其中还有人所未道的危险。人类历史上第一次，我们能够挑战生物圈中积起的分子多样性。我们能够造出各种各样新奇的分子。其中我们也许会发现神奇的新医药，也许会发现危险的新毒药。浮士德作成了他的交易；亚当和夏娃吃下了智慧树上的果子。我们既然已经开始，想停下已是不可能了。我们不可以萎缩自己的眼光；可是，我们也没法预言这样下去的后果。当智人举起装了柄的石斧、心中绽满了征服之花的时候，他的处境岂不也是一样。他没有、我们也不能预言自己的行为荡起的涟漪会产生什么后果。我们生活在一个沙丘上；是我们自己堆起了沙丘，又是我们自己从上面攀越，每走一步都可能引起塌方。我们曾经妄想，自己怎么也能预言一点点后事吧。现在，这妄想已是一去不复返了。

如今的浮士德又作了怎样的交易？在第六章里，我们看到，生物圈拥有大约 1000 万种小的有机分子和 10 万亿蛋白及其他多聚物。我们已有证据表明，生物圈可能处在亚临界和超临界的边缘上，迸发出大大小小的分子创新。我们忽然纳闷儿，相互连接、布满地球的生物代谢，会不会是空间中占地数十个百万秒差距的最最复杂的化工厂。

生物技术的革命，克隆之谜和克隆之迷——直至对于克隆遗传物质本身的迷恋，都告诉我们，我们能够搞一次大爆炸，让分子多样性大大增加，搞出 150 亿年宇宙史中任何时刻、任何地方都不曾组装过的分子形式。说是新医药和新毒药还都是往保守里说。我们实在不知道自己在高高兴兴堆起的高高的分子沙丘上到底要干什么。



实用分子进化学

现在，我们想用某种新的沙型去超越 34.5 亿年的分子进化积累起来的智慧。这个沙型叫做实用分子进化学。我们，我们当中的许多人——分子生物学家，化学家，生物学家，生物技术公司，医药业——都在跃跃欲试，要以前所未有的速度和规模创造新奇的分子；都在蠢蠢欲动，要向生物技术的新疆域进军——已经有人在谈论第二次创生了。

在出发之前，很值得回顾一下现已为人熟知、然而依然令人震惊的基因接合和基因克隆的奇迹，据说这些花招儿保证会有非凡的医学涵义。我们已经看到，你身上的每一个细胞，都窝藏着一些 DNA，它们编码着大约 10 万种蛋白。这些蛋白在你细胞的生命中扮演着结构性和功能性的角色。20 世纪 70 年代以来，人们已经明白如何剪断人类基因串，把剪下来的那些片片段段打进病毒或其他载体，用它们去感染菌细胞或其他细胞。这样一来，那些寄主细胞就上了圈套，制造出原来由人类基因编码的蛋白来。这整个过程有个名目，叫做“基因克隆”。

对科学界和企业界来说，基因克隆还没有失去它的医学涵义。由于编码一种重要蛋白的 DNA 串被某种随机突变所改变，许多疾病出现了。通过克隆正常版本的人类基因，我们能够制造出正常的蛋白产物并用来治病。商业上最为成功的产品也许要算促红细胞生成素(EPO, the erythropoetin hormone)，它能对付贫血症，因为它能刺激血红细胞的生产。EPO 是一种叫做肽的小分子蛋白。许多制造商为它卷入诉讼，打成一团，安进(Amgen)与另一公司获胜，现在在营销上做得很好。纯以金钱计算，估计克隆人类基因在医疗上的应用将是极其巨大的。无论在美国，还是其他地方，无论在发达国家还是在发展中国家，医疗保健上的投



人都是很大的一块儿。难怪华尔街要大发兴趣，忙不迭向那一技术投以巨资了。尽管投入市场的产品为数不多，而投资者的热情也时涨时落，但是，已经聚敛起数十亿美元的资金，投入到应许之地中目力所及的这一角上。

此外，人类基因组工程也早已上路。由于基因组编码我们身上所有的蛋白，对于所有正常人类蛋白及其变化规律的了解已经为期不远了。届时一定会获得大量的知识。由于每一种蛋白都可能出故障，了解了那些蛋白，我们就能设计出恰当的治疗方法，从越来越微妙的药剂，直到通过基因疗法换掉有毛病的基因。

我说“微妙的”药剂是什么意思呢？我们已经讨论过，每个细胞内都有基因组协调网络，协调着个体发育的基因活动。我们已在灯泡模型里演示过，一个灯泡的活动受到轻微的干扰，就能引起一连串的改变，像瀑布一样扫过整个网络。药品侵入到我们的组织中，是因为它们键接上我们细胞中的分子；通过键接，药品就能引起一连串的改变。有些改变是有益的，另一些是有害的，那就是药方上列出的种种副作用，如果人们知道那些副作用的话。我说“微妙”，意思是我们需要一些精确的分子之凿，既能除病，又能斩除副作用。那么，这些微妙的医药从何而来呢？答曰：来自新型分子的巨大多样性——DNA、RNA、蛋白和我们现在所能造出的小分子。

传统的生物技术曾致力于克隆人类基因及其蛋白。可是，我们为什么非得相信，对我们有用的蛋白，只能来自我们自身呢？且让我们想一想，我们身上总共可能有多少种蛋白，假如只考虑那些含有 100 个氨基酸的蛋白的话（大多数生物蛋白含有数百个氨基酸）。生物蛋白只动用 20 种氨基酸——氨基乙酸、丙氨酸、赖氨酸、精氨酸，等等。蛋白是这些东西的线性序列。画出 20 种颜色的珠子。一个含有 100 个氨基酸的蛋白就是 100 个珠子穿在一串儿。珠串种类的数目，就是珠子种类的数目自乘 100



次。在这里就是 20 自乘 100 次，也就是 20^{100} ，约等于 10^{120} ，或者说 1 后面跟着 120 个 0。哪怕在联邦预算数字庞大的今天， 10^{120} 也是个不小的数目。据估计，宇宙中氢分子的总数为 10^{60} 。所以，长度为 100 个氨基酸的蛋白的可能数目，就等于宇宙中氢分子总数的平方。

我们可能设想，通过自然选择，大自然试验出如此惊人的数目的组合，拒绝了所有其他的组合，只留下为数有限的子集，让它们进入现世众生的生命之中，所以，我们大概没有理由在我们自身的基因组之外另有他求了。可是，仔细想一想，就知道这想法并不合理。还记得第二章里我们算过的一笔账吗？那时我们说过，由一定的蛋白的集合组成的细胞，是组装完好、一下子跳出来的。罗伯特·夏皮罗估算过哥伦布所能梦见的所有海洋中所能发生的分子试验的总数。我觉得此论还是有道理的。按夏皮罗的算法，设若一个“试验”占地儿为 1 立方微米，用的时间为 1 微秒，那么，自从地球形成到如今，时间也不算短了，所能发生的试验也不过 10^{51} 次。就算每一次试验都能创造出一种新蛋白，那也只有 10^{51} 种长度为 100 的蛋白创生出来。那样说来，就只有现存巨量蛋白的很小一部分能够出现。可是，比之可能造出的蛋白的总量，生命已经尝试过的，还只是微乎其微的一小部分呢。

假如只有这么少的一部分蛋白领受过太阳的温暖，那么，给人类探索留下的漫游空间还多多的呢。在广阔的“蛋白空间”中，进化只不过作了非常有限的取样而已。而且，考虑到自然选择倾向于偏留它认为有用的那些形式，那么，进化所作的探索，很可能就更加有限了。

应用分子进化学乃基于一个基本的认识，那就是，在蛋白空间的近域和远域，DNA 空间也好，RNA 空间也好，完全有可能包容有巨大实用价值的新型分子。其中的中心思想很简单：产生上十亿、上万亿、上亿兆的随机 DNA、RNA 活蛋白序列，应学



会搜寻这一巨大的、令人目瞪口呆的分子多样性，以便从中找到我们所需要的有用的分子。不管是福是祸，我们总会找到可怕的新毒素——像以往一样，我们永远也不会知道那些新发现是福是祸。

我想把这个发现新药的新路子叫做应用分子进化学。分子生物学界有个大英雄叫作西德尼·勃伦纳(Sidney Brenner)的，发明过三个一组的遗传密码，还写过许多带点诽谤性的评论，他喜欢用另一个名目来指称这个发现药品的新时代。他的说法是句更简单醒目的广告语：“无理的药物设计。”

做出足够多的分子，从中选出一些管事儿的。需要的话，加以改进。为什么不呢？自然母亲就是这么干的。亏了有一大群分子生物学家和化学家的聪明才智，这一新的想法渐趋确立；岂但是确立，简直是很火。眼下，一些小规模的生物技术公司正在建立肽、DNA 和 RNA 的“分子库”：其中有上万亿种分子，不愁选不出有用的来。

盘查上万亿种 DNA、RNA 和蛋白分子？听起来很难做，可实际上并不很难。我自己做过的第一个分子库就有上 10 亿种随机 DNA 序列，也曾把每一种序列塞进 10 亿个叫做 λ 的病毒的拷贝里。假如你怕落在人后，急着要建成你自己的分子库，这里有个好办法：朋友里谁有部 DNA 合成机，要他给你制作一些有 100 个核苷的 DNA 序列。一般来讲，人们都想制作某一种 100 核苷的 DNA 序列的上万亿个拷贝。可是，要一下子做出上万亿种不同的含有 100 核苷的随机 DNA 序列却不是好耍的。假如你在一头一尾加上数种恰当的核苷，创造出特定的地址，做成的分子库就不难打入某个病毒或其他寄主。要办到这件事，寄主自己的双条带 DNA 就得由一种酶截断，生出两个单条带，每条有两个“末端”，一端结束以数种核苷，它们通过沃森-克里克碱基配对儿跟你的分子库里那些 DNA 序列的特定单条带端上的核苷相



配。把你库里的上万亿随机 DNA 序列跟其“末端”暴露于一根微管的那些病毒的上万亿 DNA 拷贝相混合，加进数种众所周知的酶以便把你的 DNA 序列粘到那些病毒 DNA 上去，等待数小时，那么……那么，假如你走运，你就已经把那一仓库上万亿种随机 DNA 分子克隆成上万亿种幸运的病毒拷贝了。现在，你要做的就是在这上万亿的随机基因里寻找，看能不能找到你要的东西：一些能执行某种特定生化任务的序列。

你能指望它们派上什么用场呢？让它们作新的药物，新的疫苗，新的酶，新的生物传感器，最终，也许是某种实验室造物：某种集体自动催化的分子系统，那就是新的生命。我随后就要勾画这样的可能性。

可是，从数十亿种多少是随机的分子中，你又怎能找出那些有用的呢？这不是草垛里找针吗？至少乍看起来是这样。

找针的办法之一，基于一个非常简单的想法：假如你有把钥匙，想再配一把，那么，你得作个印模，大约用泥巴吧，这样子做成一把“镜向”钥匙，就是原来那把的“互补形”。再用这个泥模浇铸一把；要是没有合适的浇铸材料，那就得从很大的钥匙库里找一把纹样相同的。假如第二把恰好与模子相合，它看上去就会跟第一把相像，并很可能打开同一把锁。

还记得一个抗体分子键接上对应的抗原、很像一把锁对上一把钥匙的事儿吗？设若我们想找到一种肽，模样儿长得像某种荷尔蒙，比如说胰岛素。我们开始用人胰岛素去免疫一只兔子。那兔子的免疫系统会对这个入侵者做出反应，产生抗体分子。把胰岛素看作那第一把钥匙，而那个抗体分子就是那把跟抗原相配的锁。我们可以取来任何一个这样的抗体分子，加以克隆，获得许多全等的拷贝。然后，把胰岛素扔了，耍耍下述的花招：做成大约 1 亿个多少是随机的 DNA 或者 RNA 串儿，在某个病毒寄主里克隆它们，再做出多少是随机的肽或多肽——都是这个基因库编



码出来的（实际上，有很多方法能产生数十亿随机的肽）。手里有1亿种肽的库存，把所有这些肽同时暴露给抗体分子之锁的全等拷贝。任何为抗体分子所链接的肽必定都有跟胰岛素相似的形状。如此，任一这样的肽都是一把钥匙副本，都可以入选去模拟胰岛素荷尔蒙的行为。

我们用不着使用跟那个荷尔蒙本身链接的抗体。如果我们有了胰岛素或是别的什么荷尔蒙的受体（感受器），就是说荷尔蒙必须链接、以便执行自己的任务的那些分子，我们就可以用这些受体作“锁”来钓出与之相配分子钥匙副本，由它来模拟原来的荷尔蒙。不管在何种情况下，那个钥匙副本分子都是一种药物的候选者，都是一种候选的疗法，有朝一日会完善成熟，让你在发生荷尔蒙障碍时用上它。

我们也不是非得局限于寻找那些会模拟荷尔蒙的分子。应用分子进化学应当很快就能找到新的分子来链接、模拟、加强或抑制人体内的几乎任何肽或蛋白。这意味着为许多跟蛋白障碍有牵连的疾病打造出新的疗法。比如，这一技术可以用来寻找模拟成千上万种信号分子的肽，那些分子会链接人体内成百上千的特定受体。神经系统只是其中的一种情况。仅仅在人脑里，就已经发现有数百种不同的感受器，而这个名单还在迅速地加长。这些感受器跟一些神经传递素如复合胺、乙酰胆碱、肾上腺素等等数百种传递素发生反应。能够找到有选择地链接特定感受器或链接与神经传递素反应的酶的新型分子，就一定找到非常有力和有用的新疗法，来对付神经系统的障碍和情绪的紊乱。百忧解（Prozac），一种极其有用的抗抑郁剂，是通过抑制一种分解复合胺的酶而起作用的。百忧解只是一种信号，表示我们能够得到多么准确的分子工具，可用作未来的疗法。

钥—锁—钥。假如这一简单的想法能在不远的将来带给我们丰富的药物，那么，制作新型疫苗的潜力就可能是新的应许之地



里风景独好的一边。

传统上做疫苗的主要途径有两条。设若有一病毒，比如小儿麻痹症病毒，能引起疾病。作疫苗的一个经典途径就是获得死病毒并利用之。另一个途径是，发现或制造病毒的一些突变体，能削弱该病毒的毒力，使其能带来免疫性而不致病。不管用哪种方法，都是把病毒物质注入身体，给你的免疫系统装上免疫反应，以抵挡同种病毒未来的攻击。危险是明显的。假如有些死病毒还不很死呢？假如经过减毒的病毒积累成“回复突变”，然后完全恢复活力呢？更加新式的作疫苗的手续，是试图绕过这一问题，通过基因工程来克隆那个编码处于病毒表面的那种蛋白的基因。然后拿这些蛋白本身作为疫苗来注射。病人永远不接触病毒本身。

这一新的手续非常管事儿。不过，就连它也有问题。首先，你得先知道那个病的病因，是哪种病毒或其他病原体。其次，病原体必须含有一些蛋白，它们能激发某种免疫反应来抵挡该病原体。第三，你得获得那种蛋白的供应——一般要在实验室里培养那种病原体。第四，你得克隆那种编码该病原体的基因，并实际上真的制作该种疫苗。第四步一般是可行的，假如前三步已经执行。

这一钥—锁—钥手续和应用分子进化学，暗示着一整套截然不同的研制疫苗的途径，可能非常有用。设想，在上面所举的例子中，我们不是用胰岛素，而是用肝炎病毒给一只兔子免疫。我得获得针对肝炎病毒上那些有特定分子特征的抗体分子，叫做抗原决定基的东西。拿到这样的抗体之锁，我就可以搜寻多少是随机的肽分子库，以便找到一些能键接抗体并产生钥匙副本的，那些钥匙副本必须跟肝炎病毒上的抗原决定基形状相似。可是，然后呢，用这样的肽，我应能制作出对付肝炎病毒本身的疫苗，因为要用这样的替代物免疫，就要造成一种免疫反应，既对付肝炎病毒本身，又对付它的模仿者。



新的疫苗近在手边。而且这一途径最终将证明是很重要的。首先，我们根本就不需要知道病原体是什么！设若在海湾战争中，萨达姆·侯赛因在他的防线之外投下了某种致命的细菌，来挑战全球性的条约。从受感染的部队那儿获得的血清就会有高浓度的抗体来抵抗那些病原体。用这种血清，分离出新型的肽链接的那些抗体，然后显示，该种肽并不由未受感染的健康人群的血清所链接。那样，新型的肽就必须模拟那种未知的致命菌种身上的抗原决定基。这样我们就走上了通往制作抵抗未知病原体疫苗之路。但愿这一研究工作最终会连细菌战的念头都根本打消。

钥—锁—钥的路子还有更多的好处。在当前的克隆制疫苗的路子中，引起免疫反应的抗原决定基必须是某种蛋白。这样才能克隆编码该蛋白的基因并加以生产。可是，对许多病原体来说，引发免疫反应的抗原决定基并不是蛋白类抗原决定基，而是另有其他种类的分子，如复杂的多聚糖称作糖类的。例如，许多细菌都有糖类抗原决定基。传统的免疫研究显示，这种钥—锁—钥想法行得通，即使第一把钥匙，就是该致病抗原决定基，是一种糖类分子。尽管如此，副本钥匙仍可能是一种肽！简言之，肽能模拟其他种类的分子。实际上你可能早就疑心到这一点了。糖的代用品有甜味，可实际上它是一种小分子肽，是两种氨基酸组成的二肽能模拟糖。实际上，肽几乎是全能的形态模拟者。

可能如此容易地制作疫苗，对于全球的医学极其重要：这可能帮助我们对抗少见病。那些疾病可能侵及很少人，也可能侵及很多人，可是，市场太小，研制医药划不来——研制新药一般成本要上2个亿。这份成本是许多种医药、包括疫苗研制上的明显障碍。我希望，应用分子进化学能因降低医药、疫苗的研制成本而有助于为许多孤例病提供治疗。

这一切终能行得通吗？我认为，这桩事业方兴未艾，并且只能加速发展。1990年夏，三篇文章同时发表，用的是同一个想



法。写这三篇文章的研究者们意识到，我们不能局限于建立多少随机的表达随机蛋白的基因的库存，更有价值的是建立病毒库，其中，每一样病毒都在其外衣上表达一种不同的随机肽。这样，每一种病毒都会承载一个分子标签，就是它的独特的肽。由于该标签将会处于病毒的外面，这就使得它容易用链接标签本身的分子来分离那个携带该标签的病毒。

然后就是循着钥—锁—钥的途径去草垛里找针。从第一把钥匙开始，比如，从一个特定的六氨基酸序列——六肽开始。然后，做一个针对这一六肽的抗体。这抗体就是那把锁。然后，用这一抗体之锁和一个随机六肽标签之库去寻找作为副本钥匙的六肽——它能键接上抗体之锁。副本钥匙是模拟第一把六肽钥匙的候选者。我要强调，最初的试验旨在显示钥—锁—钥想法的实用性，而不是去寻找有医疗作用的分子。

科学家们一开始用的是能编码六氨基酸序列的随机 DNA 串儿，用它们克隆出编码一种特定类型病毒的外衣蛋白的基因。这样，任何这样的病毒都会带有自己特定的六氨基酸串，附着于自己表面上作着自己的标签。在 20 种氨基酸里，可能的六氨基酸串的数目为 20^6 ，或者说 6400 万。这 6400 万里面，已经有 2100 万种不同的肽被科学家用这一方法建立了库存。

库存既已建立，科学家们便挑选一种特殊的六肽作为第一把钥匙，然后获得了与之相配的抗体之锁。现在的想法，是用这把抗体锁分子去“钓出”带有钥匙副本的六肽标签的病毒来。要做成这一点，抗体分子从化学上讲就要跟 petri 盘子底相连接。有着 2100 万不同种病毒的分子库在那个盘子里培养着。希望有那么几种病毒会带有六肽标签，它们会作为钥匙副本跟抗体锁分子相连接。那些不跟抗体分子连接的病毒被涮掉，然后，改变条件，放出任何其六肽标签跟抗体之锁有联系的病毒。通过这番手续，这些试验成功地找到了钥匙的副本。



成果是惊人的，并且确立了许多个关键性的要点：大约有 2000 万个六肽分子库存已经搜寻过，并找到了 19 种作为钥匙副本的肽。这样，两种六肽相似程度很高、有望连接上同一个抗体分子的概率大约就是一百万分之一。找到分子模拟者并没有难到不可思议的程度。草垛里针跟草的比例大约为 100 万根草里有一根针。平均说来，这些六肽在 6 个氨基酸位置上有三处跟原先的六肽不同。还有一个在六个位置上全都不同！这样说来，样子相似的分子可能在蛋白空间里相隔很远。对于大多数生物学家来说，这一点是令人惊讶的。有一个大家熟悉的想法，就是认为几乎全等的分子常常具有几乎全等的形状。然而，上述结果却让人们越来越起疑心：人们疑心，非常不同的分子可能具有非常相似的形状！这是一个非常要紧的事实，一会儿还要回头说到它。

赛跑开始了。美国的、欧洲的、日本的和其他地方的生物技术和制药公司已开始把资金投入到了发现药物的新路子：别去设计分子。机灵着点儿，悄悄地，一声别吭。建立巨大的分子库，然后学着选出你所需要的。

这番愈来愈烈的热情是理由十足的。有用的分子并不局限于蛋白和肽。RNA 分子和 DNA 分子也可能被发现，并通过应用分子进化学来加以完善。一个名为吉立得（Gilead）的小公司正在测试自己开发出来的一种 DNA 分子，那种分子能连接凝血酶——一种在形成血块方面起作用的分子。人们希望，这个 DNA 分子或许能有助于防止有害的血液凝结。

谁曾想到过，DNA，这个稳定的遗传信息载体，能够被用来创造一种分子，跟凝血酶相键接，并且可能会派上临床的用场？并且，DNA 分子也没本事键接配合基。可是，还记得你身体内的每一细胞中那 10 万基因会通过制造跟特殊 DNA 地址相连接的蛋白来互相打开、关上吗？什么东西也不能阻止我们建立基本上是随机的 DNA 序列库，并研制开发全新的序列，把它们塞进基因



组，并由此控制基因活动的雪崩。也没有什么东西会排斥我们研制开发会编码新型蛋白的新型基因，那些蛋白会连接细胞自身的协调基因，并由此改变基因的活动样式。比如，在许多情况下，癌症是由于一些叫做致癌基因抑制素的细胞基因发生变异引起的。致癌基因抑制素通过关闭细胞里的癌症基因而起作用。没有什么能阻止我们研制开发全新的癌症基因抑制素，其蛋白产物能够关闭细胞里的癌症基因。我们料想不到的一大批备用药品正在前方等待着我们呢。

几年前，哈佛大学医学院的杰克·佐斯塔克(Jack Szostak)和安迪·埃灵顿(Andy Ellington)发表了一篇令人鼓舞的文章。两人发现，他们能一下子搜寻 10 万亿随机 RNA 分子，从中找出跟一种小有机分子连接的 RNA 分子来。一下子 10 万亿呀！

你已经知道，RNA 分子能催化反应。佐斯塔克和埃灵顿纳闷儿，他们能不能找到这样一些 RNA 分子，它们会跟随便哪些小分子链接。如果能办到，这样的 RNA 分子要么直接可作有用的药物，要么可以经过一番琢磨，造作出全新的核糖酶来。他们制作出生化学家称之为亲和柱 (affinity column) 的东西，那东西携带着一种特殊的小有机分子，就是一种染料。这样的柱通常像一串珠子，染料的分子就附着在这些珠子上。这里的想法是，把某种溶液倾倒在柱子上，让那些珠子漂起来。溶液中任何跟珠子上的染料链接的分子都将被留住；那些不跟珠子上的染料链接的分子就会迅速地通过柱子，从容器底部流出。他们俩如此这般造出了大约有 10 万亿个随机 RNA 序列的分子库。将这 10 万亿 RNA 序列倾倒在每一条柱子上。有些 RNA 序列跟柱子上的染料相链接。其余的迅速通过柱子。链接的 RNA 串儿通过改变化学条件和清洗而被除去。再作几步，作者们就能够演示，他们已经“钓出了”大约 1 万个能有选择地跟染料链接的串儿。由于这些研究者是从 10 万亿个序列开始的，而跟染料相链接的串儿有 1 万



个，那么，一个随机挑出的 RNA 串儿跟任一染料分子链接的机会就大约是 1 万比 10 万亿，也就是十亿分之一。

这一结果是惊人的。这意味着：随便拣起一种分子形状，一种染料，一个病毒上的抗原决定基，一个受体分子上的分子槽，做成一个有 10 万亿随机 RNA 串儿的分子库。10 亿里就会有一个将会链接上你的地址。10 亿分之一的确是一大垛草里的一根针。可是，想想感到吃惊的事是：现在我们同时在做两件事：一边制造，一边寻找，在数万亿种分子里，钓出我们所需要的分子，就是我们要找的潜在的药物。

我们在第六章里看到，整个地球上的蛋白估计有 10 万亿种。佐斯塔克和埃灵顿，现在还有很多其他人，正在用几根小小的试管，小菜一碟般地制造着同样多花样的 RNA 串儿，并同时搜寻所有的串儿，从中找出极小的部分为我所用。我们现已经在用小小的试管来跟地球的多样性竞争了。想想看，进化用了那么久长的岁月才做出它的选择，而我们却已经能在数小时内拣选出我们的所需了。

普罗米修斯呵，你知道自己开始的是一桩怎样的事业吗？

万用分子工具箱

我们已经看到，肽能模拟别的分子。我们看到，肽有百万分之一的机会链接一个抗体分子，而一个 RNA 分子也有百万分之一的机会链接一个小的有机染料。这一事实已足够令人惊讶，可是，我们以上所讨论的那些事实，预示着我们关于分子作用的概念会发生更大的变迁。现在可以合情合理地考虑下面的假说了：一些多聚物、蛋白、DNA、RNA，或其他分子的有限的集合，可能成为能完成我们所需的任何基本功能的万用工具箱。拥有全套工具箱所需的多样性或许是 1 亿到 1000 千亿种多聚物。



我要警告你：关于万用分子工具箱的想法是异端的。可是，假如这想法对，那么，其含义就是：我们几乎可以用它去完成我们所需的任何分子功能。

此中的中心思想简单得很：分子序列的数量大大多于分子形状的数量！我们已经看到，在 100 氨基酸组成的蛋白里面，就有 10^{120} 种序列。可是，有多少种有效的不同形状能够形成呢？没人知道。有很好的证据暗示，在像原子一样大、分子之间能彼此作用的范围内，只有大约 1 亿种有效的不同分子形状存在。

我有两个朋友，一个是洛斯阿拉莫斯的艾伦·佩雷尔森 (Alan Perelson)，一个是伯克利的乔治·奥斯特 (George Oster)。据我所知，他们两人是最早清楚地阐明这一问题的研究者。佩雷尔森和奥斯特那时候纳闷儿，人的免疫系统为什么好像有 1 亿种抗体分子，而不是数万亿种？为什么不是 42 种，像《银河系便车指南》 (*The Hitchhiker's Guide to the Galaxy*) 里的万应答案那样？佩雷尔森和奥斯特定义了一个抽象的“形状空间”，有三个维度对应空间三维，然后定义其他维度，对应分子的其他性状，诸如净电荷，分子上某突起在水中的溶解性，等等。把形状空间看作某种 N 维的盒子或房间。任何形状都是这间房子里的一个点。现在便是第一个要点：当一个抗体分子键接上一个抗原时，那匹配并不是天衣无缝的，而只是仿佛大概的，恰像万能钥匙那样，配得很好，恰能开锁，但不是很精确。所以，我们可以把一个抗体分子看作是键接着形状空间里的形状相似的“一团”抗原。

在形状空间这个概念的框架里面，有一个明显的思想，还有两个远为深刻的思想。那个明显的想法是，相似的分子可能有相似的形状，所以处于形状空间的同一个团里。那两个更深刻的想法之一是：由于每一抗体都在形状空间中覆盖一个团，那么，有限数目的团就会覆盖整个形状空间！这一点非常要紧。由于分子识别是马马虎虎，而不是精确的，有限数目的抗体分子就能跟所



有可能的形状相匹配！有限数目的抗体分子就是一个万用工具箱，能够识别所有可能的形状。有限数目的分子万能钥匙，足以打开所有的分子之锁。

多少把钥匙就够数呢？要多少个团才能覆盖整个形状空间呢？要回答这个问题，我们需要知道每个团有多大。

要估计形状空间里一个抗体分子覆盖的一个团体积有多大，佩雷尔森和奥斯特运用了一个事实，那就是，最简单的免疫系统，比如说蝶螈的那些，都有大约 1 万种抗体分子。现在，为了对进化有益，这样的抗体形状的节目单最好能覆盖形状空间的不算很小的一部分，不然就不会有人选的优越性。只有通过链接相当大的一部分形状空间，免疫系统才能链接上足够多数目的入侵者。佩雷尔森和奥斯特猜想，要链接的最小有用部分应为 $1/e$ ，也就是说形状空间的 37%。接着就能算出，1 万抗体分子中，每一分子覆盖形状空间的 37% 的万分之一。于是，他们就算出形状空间里一个团的大小来了。人类大约有 1 亿种不同的抗体分子。由于抗体分子要链接的地址多少是随机的，要覆盖形状空间中位置多少随机的团，佩雷尔森和奥斯特接下来又问，假如把 1 亿个这样大的团随机地扔到形状空间中，将会发生什么。画一些可以互相穿过的乒乓球，把它们随机地扔进你的起居室。需要多少只小球才足以填满除了那棵可怜的秋海棠之外的整个房间呢？佩雷尔森和奥斯特从数学上论证，1 亿个位置随机的小球就会覆盖或充满几乎整个的形状空间。

这么说，1 亿把万能钥匙就足够用的了。有效的不同形状总共才有 1 亿来种，尽管可能的多聚物和具有这些形状的其他分子会是超天文数字的。

再发表关于形状空间的第二个深刻思想：不只是相似的分子有相似的形状，而且有一小部分含有不过几十个原子的非常不同的分子，可以有“相同的”区域性形状。在化学上非常不同的分



子，比如说肽和抗原决定基，或者内啡肽和鸦片，在特定区域内都能有看起来非常相似的分子特征，并因而处于形状空间的同一个团里，哪怕所包含的原子并不一样。

于是我们得出一个关键的结论：你的免疫系统，虽然只制作着大约 1 亿种抗体分子，却很可能识别出任何可能的抗原！换句话说，你个人的免疫系统已经是一个万用工具箱，能识别所有的分子抗原决定基。

有这种能力的还不止是抗体分子。万用工具箱几乎一定是由足够多样的分子构成的。我们应能用随机蛋白或随机 RNA 分子去连接任何抗原决定基，而造出一个万用工具箱。含有 1 亿或 1000 亿个分子的万用工具箱应基本上足以链接任何分子。

链接是一回事，催化又是另一回事。可是，上述发现却引导我们想到进一步的可能：有限数目的多聚物的集合或许也能作为一个万用酶工具箱而起作用。如果是这样，那么，1 亿或 100 万亿种分子就足以执行任何催化任务。

佩雷尔森和奥斯特给我们介绍了形状空间的事儿。让我们再走一步，看一看我们将称之为任务空间的情况。把一种酶看作是在执行某种催化任务：链接一个反应的转变状态，由此鼓励一个若非此酶就不大可能发生的反应。通过链接该转变状态，那个酶便催化该反应。在形状空间中，相似的分子可能有相似的形状，但是，非常不同的分子也可以有同样的形状。所以，一个样儿，在任务空间里，相似的反应就是相似的任务，但非常不同的反应也可以构成同样的任务。比如，两个从化学上讲迥然不同的反应可能有彼此相似的转变状态。同一个酶既能链接这一个转变状态，也会链接另一个转变状态，于是，那个酶就能催化那两个反应。在任务空间里，两个反应会处于同一个“团”里。一个抗体在形状空间里能覆盖一个团，有限数目的抗体分子就能覆盖整个形状空间。类似地，一个酶覆盖一个相似的反应之团。于是，有限数目的酶就



能覆盖整个的催化任务空间，而成为一个万用酶工具箱。

实际上我们已经知道，这样的事很可能是真的，我们只是没有对自己说出来。你个人的免疫节目单可能就已经是一个万用酶工具箱了。

还记得吗，有可能造出一些有催化作用的抗体来，就是说，抗体分子能够催化反应。要做到这一点，你可能愿意通过一个反应的转变状态来免疫，从而获得一种能够键接该转变状态的抗体分子，从而催化那个反应。可惜的是，转变状态不稳定，只停留十亿分之一秒，所以你没法儿免疫该转变状态本身。相反，却可能利用其他分子，那些分子稳定的形态看上去近似于该反应的转变状态。于是，那些稳定的模拟者便是第二形状，代表着跟那个转变状态同样的催化任务。你可以免疫那个转变状态的稳定相似物。而且，为对付那个转变状态的稳定相似物而培养起来的抗体中，有十分之一实际上能催化原初的反应。

我们已经说到，我们认为，人类的免疫节目单里的大约 1 亿种抗体分子是各形状通用的；认为一个或多个抗体分子能键接并识别任何抗原。可是，那意味着，人类免疫节目单可能也已经是一个万用酶工具箱了。如果是这样，你自己的免疫系统就已经窝藏着抗体分子，它们能催化几乎所有的反应。

应用分子进化学许诺着巨大的实际利益。运用 DNA、RNA 和蛋白库，新的医药、疫苗、酶，还有那些在基因组调节网络里控制雪崩般基因活动的 DNA 调节地址，还有其他有用的生物分子就都会横在前方，等待我们前去发现。可是还不止这些。西奈山的那一边，等待我们的还有更多。

随机化学

第六章里，我们讨论过生物圈根本上的超临界性质及其在生



命起源中可能扮演的角色。我们看到，足够多样的分子的反应系统能够起火，而创造出集体自动催化的系统。我们还看到，这样的系统会表现出亚临界行为或超临界行为。在超临界的情况下，当有机分子和候选酶的多样性超过一个阈值时，该化学反应系统的分子多样性就会发生爆炸。同样的原理也可能有助于我们发现有用的新分子。我把这个称作随机化学。

目前，肽和蛋白的药用价值是有限的。理由很简单。蛋白像肉一样，会在你的肠道里消化掉。蛋白药物不能口服。制药公司更喜欢可以口服的小有机分子。

大的制药公司已经投入数十年的经营，已聚积起成千上万的小有机分子的分子库，并做了搜寻有用的医药性质的工作。这些分子库不是合成的，就是从取样细菌、热带植物等等而来的。

（如你所知，关于保存基因多样性的议论，其中有一部分理由就是它有潜在的医药利益。我个人认为，这样的议论未免过分。对40亿年进化成果的纯粹尊敬就应该足以让我们所有人信服。难道我们的谦卑心和敬畏心已经丧失殆尽了吗？）

我们对于化学系统的超临界行为和亚临界行为的研究表明，往大里说，我们的分子库可能超越“寥寥”十数万种分子。相反，我们可以着眼于制造数十亿甚至数万亿的新有机分子，并致力于在这一多样性爆炸中寻出一批备用药品来。

怎么做？制造一场超临界爆炸。还记得我们用有机分子和抗体分子作候选酶做的试验吗（见图6.3）？取1000来种不同的有机分子，把它们置于溶液中。混入约1亿种抗体分子，搅匀。这些抗体分子就是我们的候选酶。如果这种混合物是超临界的，那么，过一段时间，成千的、然后成百万的、然后上十亿的新有机分子就会形成。有些反应路径会顺畅而快捷，也有一些慢慢腾腾。但是，有几点是明显的：如果我们开始时用1000种分子，浓度为1毫摩尔，而多样性一爆炸就扩张了100万倍，造成了上



十亿种有机分子，然后，达到平衡时，平均浓度就会下降大约100万倍。这意味着，高多样性的分子库的浓度平均将会在十亿分之一摩尔这个等次上。这个浓度就不算很低了。许多细胞感受器在键接它们的荷尔蒙配合基时，其荷尔蒙就是在这个浓度上，甚至比这还低呢。我们要钓出有意思的分子，靠的就是这些反应。

在我们的汤里加上点儿细胞感受器，是能在是一亿分之一摩尔的浓度上发生反应的。咱头脑先简单点。拿一个克隆的感受器当荷尔蒙，比如当雌激素。再加一点稀淡稀淡的非常“来劲”的加了放射性标签的雌激素。加了标签的雌激素将会密切地键接自己的感受器。现在，假如在那超临界的反应混合物里，有一个或多个新型分子会像雌激素一样亲密地键接雌激素感受器，这些新型的分子就会取代那些跟感受器打得火热的雌激素。这种取代能够通过测量放射性雌激素分子探测出来。这样，我们就能知道，在我们的超临界反应混合物里，有一些未知类型的分子已经形成，并且在模拟雌激素，模拟得很好，能键接上雌激素的感受器。这种未知分子就是模拟或调节雌激素本身的候选药品。

现在，我们要做的只剩下一件事：分离那种未知的分子，确定它是什么。那种分子大概是从我们一开始用的初始集合中通过一系列反应累积而成的，那个集合里有1000种有机分子作建筑构件。具体点说，比如，那个初始集合里有4个反应被催化，累积起7个分子做成了那个未知的雌激素模拟者。

接着可以这样进行：做32个容器。在每个容器里，放入所有那1000种分子砌块。在每一个容器里，再放入从1亿种抗体酶分子中随机挑选出来的50%。现在，任一容器里含有能催化那4种关键反应的4种关键抗体分子的概率为 $1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2$ ，或者说是 $1/16$ 。于是，根据概率，32个容器里，有两个容器里面应有那4种关键抗体分子的集合。现在，把那个反应在32个



容器里做一遍。32 个容器里有两个做成了该未知雌激素模拟者，这可以通过从雌激素感受器那儿取代带有标签的雌激素这件事上检验出来。挑出两个容器的一个，每一个里面装有原初的抗体混合物里面随机的 50%。现在，你已经降低了抗体多样性的 50%。把这个“减一半”的手续重复 26 遍，你就降低到了那个集合的水平：大约四个能做成该未知雌激素模拟者的关键抗体分子。简言之，你已经从那 1000 个建筑砌块中筛簸出合成该模拟者所需的那四个关键抗体，而你做到了这一切的时候还不知道那个模拟者是什么。在你扔掉其他抗体分子的时候，那些被催化的副反应的数目将会减少。为什么？副反应是被某些抗体分子催化的。随着你减少抗体分子的数目，那些副反应不再受到催化；所以，未知模拟者的浓度就会增加。最后，你一方面得到了足够高浓度的未知雌激素模拟者以便确定其特征并随意加以合成，另一方面，你已经在事先不知道该模拟者可能的结构的情况下挑选出一组作为催化剂的抗体来合成一个雌激素模拟者了。你已经完成了一个可被称作随机化学的手续。

一批多得不可思议的备用药品唾手可得了。

实验室创造生命

Homo ludens, 游戏的人。我已经描述了两个具有高度潜在医疗意义的领域：一个是应用分子进化学，一个是随机化学。科学发现总是有些神秘色彩的，而且还是同时发生（synchronicity）式的神秘。各行各业的许多人士被这些想法吸引前来。在我这儿，两个想法都来自游戏。实际上，我那时正在玩弄着一些关于生命如何自然出现的梦想，那是一种关于复杂化学的近乎不可避免的表达。我发现了通往自动催化系统的道路，关于这个你现在已经知道了。那个理论基于一些关于概率的模型，就是说，一个随机



挑选的蛋白催化一个随机挑选的反应。有一天，听着一个关于试验开发新酶以催化新反应的研讨会，我突发此想：何不做成随机的蛋白，并当真找出一种可能性：一个随机挑选的蛋白催化一个随机挑选的反应呢？

真的，为什么不呢？于是有了应用分子进化学。

而且，假如化学反应曲线图显示出亚临界行为和超临界行为，何不混合抗体分子和有机分子，催化一个超临界的爆炸呢？

真的，为什么不呢？于是有了随机化学。

可是，假如应用分子进化学现在许诺着新分子的好收成，它同样许诺着多聚物的好收成，这些多聚物能随机催化挑选出的反应。而且，假如随机化学许诺着多样化的有机分子库，让我们可以从筛簸明天的医药，它同样可以许诺化学多样性的大爆炸。

真的，为什么不呢？假如在随后的10年里，某个试验小组重新造出的生命，在某种真实的恒化器里突地出现，造出原生细胞，它们彼此合作共同进化到亚临界—超临界之间的边界，我是不会过于惊讶的。我不会太感惊讶，但我会兴奋得发抖。

游戏的人需要制作的人和智慧的人。可以设想，在地球整个历史上，也许在整个宇宙的历史上，只有在此时此刻，我们站到了创造比以往任何时候都要宏大的分子形态多样性的边缘上。丰富的有用的新分子。未知的可怕的新分子。我们会做下去吗？是的，当然会做下去。只要技术条件允许，我们总会孜孜以求。说到底，我们既是会制造的人，又是喜欢游戏的人。可是，我们同时又会是智慧的人。能够算计出自己行为的后果吗？不，我们不能。我们过去从来没有这能力，将来也永远不会有。我们就像自组织的沙堆上的沙粒，我们被自己的发明随意摆布。我们都处于被自己触发的大大小的塌方冲走的危险之中。



第八章 高地探险

高地探险

“自然界充满了相互倾轧，”达尔文曾在其日记中这样写道，这使我们得以一窥他自己对自然选择最初的认识。每一种生物，适应能力不论高低，都纷纷挤入混乱的生命大家庭中，填补其中的角落和缝隙，与其他所有的生物努力奋争，以便使自己能挤进充满机遇的上层。19世纪人们心目中的自然选择法则，是露着血红的牙齿和爪子的。自然选择的规律永远是优胜劣汰，不停地筛选，这样，经过无数的世代，适应的物种的有益变异就会积累得越来越多，发展繁荣起来。到了20世纪40年代，生物学家将一个适者生存的生物世界描绘作一种进化地形，最适于生存的物种代表其中的最高峰，而进化的动因，是基因突变、重组、自然选择等，这些因素驱动生物种群努力爬到最高的顶峰。

生命的历程就是向更高等级迈进的高地探险。

毫无疑问：自达尔文以来，人们心中所理解的生物学，就是通过自然选择，把对于生物体未来的发展有用的偶然性基因突变过滤保存下来的过程。我们现在对于生命的观点，无不受这一理论的左右。其中最主要的影响之一，就是我们现在认为自然选



择是生物世界秩序的惟一根源。我们认为，没有自然选择，就没有秩序，只有混沌。而我们，是多么出乎意料，又是多么幸运。

虽然在这本书中，我们见识了一些权威资料表明，秩序乃是自发的。我们真的能确信，没有自然选择，自然界就是无序的吗？我不这么认为。我相信，我们正进入一个新的时代，开始把生命看作是在一个远未达到平衡状态的宇宙中，一种朝有序方向发展的倾向的产物。我认为，从生命的起源，到个体发生的秩序，到生态系统的平衡（我们将在第十章讨论这一问题），这一系列的现象都是秩序的自然体现。诚然，我本人又是个达尔文主义者，相信自然选择的功效。我们现在亟待创建一个新的理论框架，在此框架中，自组织、自然选择和进化史上的意外事件都能找到各自的位置。这样一个理论框架尚不存在。本章的目的，就是力图揭示在生命的高地探险中，自然选择是如何起作用的；同时，也将讨论它的局限，并试图以一种新的方式，将自组织、自然选择和意外事件结合起来考虑。

对于我的读者中那些非生物学专业人士，我需要声明，自组织在生命进化的历史中占有一席之地。你可能会认为这是不言自明的。的确，这一点看上去似乎是再明显不过的了。毕竟，滴在水上的油脂会自然形成圆形的薄膜，就像细胞膜一样，并不需要自然选择的作用。不用把什么事情都交给自然选择。但是，不搞生物学的人无法明白，达尔文之后的生物学家头脑中的“自然选择是秩序的惟一源泉”这样的观念是多么的根深蒂固。达尔文之前，理性形态学者，由于认为物种是固定不变的，就从搜集的不同物种中找寻形态的规律。比如，大家熟悉的一个例子是爬行动物、鸟类和哺乳动物的脊椎非常相似。虽然这些 18 世纪以及 19 世纪早期的生物学家做出了许多努力，他们还是无法解释生物体所展现的秩序。达尔文给我们带来了全新的，同时也是革命性的理论。不过，达尔文的同胞威廉·帕列夫（William Paley）主教



认为先有表匠，才会有钟表，因此只有神仙圣人才能发现物种间的秩序。而根据达尔文的理论，生物的秩序不是靠上帝产生，而是靠持续不断的物竞天择优胜劣汰的自然选择。所以现在生物学者一般都坚信，造出这些完美的生物物种的是自然选择这只无形的手。断言生物学者认为自然选择是造成物种秩序的惟一根源，似乎有点言过其实，不过并不算太过。要说当今的生物学有一个核心理论的话，那就是自然选择。

自然选择是生物秩序的惟一的、甚至最基本的根源。那就是说，我们人类，是一种偶然产生的生命形式。本来，我们很容易就会演化成其他任何形式，甚至根本就不会出现。

毫无疑问，这就是几乎所有的当代生物学家所持的核心的、确信无疑的观点。在我的科学生涯中，虽然我花费了相当的精力，探寻这一观点为何会存在严重不足，但必须承认，这一标准的观点确实很吸引人。生物学者把生物体看作是一些精心组装起来的物件，而完成这个工作的能工巧匠就是进化。生物体都是一些小题大做的机器，比如，我们可以看到，早期的某种鱼的下颌骨变成了哺乳动物的内耳。对于设计问题，生物总是充满了奇怪无比的解决方式。生物学者每当发现这些，就兴奋异常，互相交流，尤其是喜欢冲我们这些喜欢鼓捣点生物学理论的人说：“你事先决不会想到这一点！”毫无疑问，他们的判断是正确的。生物体做起事来的确方式怪异。我们必须坚信这一点。本书的读者，必须事先提高警惕，各位正在阅读的书，出自一位抱有离经叛道观点的生物学者之手。离经叛道的观点并不会由于离经叛道、印在了书上或者是有趣，而变得正确。但是我希望能够说服各位，让大家去注意一些无法回避的原因，从而相信这些观点也许是正确的。

为一些明显的规则找寻证据总是比较容易的。比如，观察一个松球，数一数上面的螺旋。你会发现上面会有 8 条向左的螺



旋，13条向右的螺旋，或者是13条向左，21条向右，或者是其他的组合。令人惊奇的是，这些数的排列规律和著名的斐波纳契数列相吻合：1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21...在这个数列中，每一项都是前面两项的和。这一著名的现象就是叶序规律。许多生物学家想努力探明为何松球、葵花等等植物都遵循这一特别的规律。生物体做事的确怪异，但是这些怪异之处并不一定是自然选择或者偶然现象的结果。对叶序所做的最好的研究，也牵扯到自组织理论。斯坦福大学的保罗·格林(Paul Green)令人信服地证明道，构成像葵花、松球等的植物组织的生长点在生长的时候，其特殊的生长过程使得斐波纳契数列成为植物能够产生的最简单的自我复制模式。就像雪片是六角形的那样，松球和它所反映出的叶序规律都是自然而然产生的。

在标准理论中，重要的前提都是预先假定、不证自明的，正因如此，生物体是特别的、奇妙的装置。生物学中最重要的假设，同时也是达尔文整个理论体系的最重要的假设，就是“渐变论”，即基因的突变会引起生物体性状小幅度的变异——也就是说，仅仅是表型的改变。这种观点进而假定，这些微小的有用变异可以一点一滴积累起来，经历了亿万年，造就了如今我们看到的复杂的生物秩序。

然而，这些理论真的是正确无误吗？真的有明显的证据表明“渐变论”总是起作用吗？另外，即使对于目前的生物体渐变论能站得住脚的话，它就一定是正确的？也就是说，是不是所有的复杂系统，都能够经过不断将微小的变化积累起来而产生进化？如果并非所有的复杂系统，而是仅有生物体能够如此进化，那么是什么特性，允许通过进化过程产生某些复杂系统？进一步说，这些特性和进化能力的根源是什么？进化是不是足以改造生物体，使之能通过突变、重组和自然选择而发生变化？或者，是否还需要加上秩序的另外一种根源——自发的自组织——来解释？



公平地说，达尔文确实认为，在通常情况下，渐进发展是可能的。他选用的例子是饲养家畜和培育作物的人所作的选择。但是从为了改变某种动物耳朵的形状而进行的人工选择这样的例子，就一下子得出结论，说复杂生物体的所有性状，都可以通过不断积累有用的变异而进化产生，这中间的步子未免太大了。

我将会向大家证明，达尔文的假设几乎肯定是错误的。渐变论并不总是成立的。在一些复杂的系统中，任何微小的改变都会最终导致整个体系灾难性的变化。下文将讨论，在这些事例中自然选择无法创造复杂的系统。这就是自然选择最根本的局限之一。此外它还有另外一个根本性局限。即使相信渐变论的人认为小的基因突变只会引起小的表型的变化，还是无法推论出自然选择可以成功地把这些小的改进积累起来。相反，在此过程中可能会发生某个“灾难性错误”。试图自我适应的物种所积累起来的，可能是一系列小的错误，而不是小的改进。即便是自然选择有过滤的作用，生物的顺序不可避免还会消失。本章的后面将对这种“灾难性错误”进行讨论。

简而言之，自然选择十分有力，但非万能。如果达尔文熟悉现在的电子计算机的话，他可能会意识到这一点。

假设我们尝试造一个能够进行比较复杂计算的电脑程序，比如计算三个相互吸引的物体的轨迹，或者是任意一个实数的7次方根。随便选择一个用0和1写就的电脑程序，然后随机转换一下0和1的数位，把1都改成0，把0都改成1。然后测试每个经过改编的程序，把适用的挑出来。你如果尝试这么做，就会发现这并不容易。为什么不呢？另外，除了创造这么个电脑程序之外，我们是否可以进行一项更为宏大的工程，编制出能够进行这种计算的最简捷的程序？就是说一个经过最大限度压缩的，去除了所有冗余的程序。

编制一个串行的电脑程序不是过于困难，就是根本不可能，



因为这样的程序脆弱得令人难以置信。串行电脑程序常有这样的指令：“对比两个数，做如下运算，以确定哪个更大”，或者是“将此运算重复 1000 遍”。程序所进行的运算和运算的顺序、逻辑细节以及重复的遍数都密切相关。这样一来，对程序的任何改变，都会使它的运算结果变得一钱不值。而我们常见的电脑程序，正是这么一种复杂系统，其结构上的小变化，所带来的并不是行为上的小变化。几乎任何结构上的小变化都会带来行为结果的灾难性变化。而且，如果我们把程序中所有的冗余都压缩掉的话，结果会更糟。在一个精简的程序中，压缩程度越高，指令上的小变化带来的后果就越严重。因此，程序越是压缩，就越难以通过进化过程获得进一步的压缩。

然而这个世界上充满了经过成功进化的复杂系统——生物体、经济结构以及我们的法律体系。我们不禁要问：“什么样的复杂系统可以经由进化过程而产生？”我必须强调，这个问题没有现成的答案，但是有一点可以肯定，即含有冗余的系统要比没有冗余的系统产生得更容易。不过，正在进化的系统中到底什么是“冗余”，我们仅仅是略知一二。

计算机科学家创立了一个称作“算法复杂性”的概念。计算机程序是一组指令的有限集，遵循这些指令，即可计算出想要的结果。凭直觉，我们可以说“难”题比“容易”的题需要更多指令来处理。某个程序的算法复杂性是由能完成计算的最短程序的长度来确定的。在实践中，我们一般无法证实某个程序是否是最简短的。更短的程序可能永远存在。不过，我们可以巧妙地利用这一判断。我们可以证明下面的表述：最短的程序在其符号行内不存在冗余。例如，假设一个真最短程序是 (1010001...)，但是我们手头现有一个程序，每个位数都重复了一遍：(11001100000011...)。在这个例子中，只要把每个重复的数位去掉，就可以去除程序中的冗余。或者，程序中还存在更为



微妙的数位组合模式可以进行压缩。也许在去除了所有的重复数位之后，我们发现每隔 225 个比特，就会出现一组相同的 0 和 1 的组合。经过重新编码，我们可以用另外的方式，来描述这种重复现象，比如说，每隔 225 比特插入 XYZ。这样一来，程序就更为简短了。如果我们能够找到并去除所有的冗余，就能够得到一个最为简短的、经过最大压缩的程序。这个程序的代码没有任何的重复组合，不可能找到并去除更多的冗余。接着我们就会发现，我们无法看出这样一个程序的代码和一组随机组合的 1 和 0 有什么区别。如果能找到规律性组合的话，就意味着还有可以去除的冗余。

想通过对某个程序进行最大化压缩得到最短的程序，相比于穷尽所有可能的程序逐一测试来找寻最短程序，花的时间似乎不可能更少。当一个程序中的所有冗余都被剔除了以后，任何一个代码的改变都会导致程序运行的灾难性变化。因此，彼此非常相似的程序所执行的运算会非常不同。

在适者生存的进化过程中，一般人认为调整是通过一个个小的变化，不断向高度适应的“高峰”攀登的过程。自然选择就是促使一个正在适应的物种向这个高峰攀登。我们可以想象一个山脉中的各种生物（或者在本例中，电脑程序）摸索着向高峰攀登。基因（或者是程序代码）中的某个随机改变，究竟是将这个物种推向更高或者更低的层次，取决于这个变化对该物种是否有利。如果该山脉的地形非常复杂，但我们对它依然感到熟悉，那么选择攀登的道路并不困难。总有能通向远处峰顶的小路，自然选择就是要挑选出最合适的选项，引导物种沿着这些道路前进。

可是由于进化中的物种无法看到整个进化地形的轮廓，寻找道路的问题就变得更加复杂了。想飞向高空俯瞰全景是不可能的。我们可以假设物种可以通过随机制造一些变异个体来进行试探。如果某种变异能够获得更高的进化层次，那么就表明这个变



异更适应环境，整个物种就会被引向这个新的位置。此后，处于新位置的物种又会利用随机变异来进行试探。于是自然选择又进一步将物种引向更高的层次。这就是达尔文的渐变论。毫无疑问，生物体的确是渐次进化提高的。同样，人们试图设计复杂的东西的时候，也是从小到大，一步步试探着直到最终完成的。生物体的进化和人们制造物品的过程非常相似。我将在第九章重点探讨这一命题。

但是当所有的细微的变异都给整个系统、生物体或产品带来灾难性的变化时，适应性就是完全随意的，于是也就不存在任何信息，能把它们引向远处更高的山峰。稍后我们将详细讨论这一问题，但是我们先暂时假设自己位于月球表面，从我们所处的位置看去，四周是陡峭的悬崖，它们也许可以通向远处更高的山峰。但是无论向何处望，视线都受到限制，看不太远。虽然不远处可能有更高的山峰，但是我们不知道它们在哪里。近处也找不到任何线索可以借以判断前进的道路。此时，寻找就是完全随意的。

而一旦寻找是完全随意的，没有任何借以判断向上道路的线索，那么找到高峰的惟一的办法就是将整个区域都搜寻一遍！这就好像是攀登勃朗峰，如果是从霞慕尼^①（Chamonix）出发，一般情况下我们只需背上背包，带上葡萄酒、奶酪、果酱、面包，或者是专用登山工具。但是在不知道勃朗峰究竟位于何处的情况下，我们就必须系统地搜寻整个阿尔卑斯山脉，每平方厘米都不放过，找寻勃朗峰的位置。

要想获得最大化压缩的电脑程序，所付出的时间一点也不比搜寻所有可能的程序少花时间。整个宇宙的生命，不足以供这样复杂的系统通过自然选择的方式来进化。假设我们所需的最小程

① 法国著名的滑雪度假胜地。——译者注



序应该有 N 个比特，符合这个长度的所有可能的程序的范围就是 2^N 。对于一个有 1000 比特的相对较小的程序来说，对应的范围之大就已是天文数字了： 2^{1000} ，也就是 10^{300} 。因此我们的第一个结论是：由于该程序是经过最大化压缩的，代码的任何变化都会对运算造成灾难性的影响。所谓的适应性是完全随机的。而接下来的一个事实是：在整个搜索范围内，只有少数几种可能性能完成所需的运算。事实上，最近，数学家葛利高里·柴廷（Gregory Chaitin）已经证明，对于大多数问题，只存在一种，或者最少数几种最短的解决程序。凭直觉我们可以判断，如果某个范围是完全随机的，同时不存在任何搜索的线索，那么最好的搜索方法就是系统地搜索所有的 10^{300} 个可能存在的程序，像大海捞针一样，把那个独一无二的最小程序找出来。这和通过搜索阿尔卑斯山区的每平方米来寻找勃朗峰没什么区别。而搜索所需的时间，则是和程序的大小有关。

因此我们可以得出结论：如果有 10^{300} 个可能的程序，同时我们必须一个一个试验来确定某个程序是不是最好的，假设我们每十亿分之一秒就可以验证一个程序的话，验证所有程序所需的时间就是 10^{291} 秒。我们可以发现，这个时间比宇宙的寿命还要漫长许多。

你也许会找其他的理由反驳。你可能会说：“好吧，进化无法造出最优的程序，或者是最优的生物体，不管怎么说，但是进化也许马上可以先制造一个带有冗余的程序或者生物体，然后对其进行压缩优化，最终得到最优的程序或者生物体。”简而言之，你可能会暂时承认，如果希望进化过程必须在所有的程序范围内搜寻一个 1000 比特长的程序的最优程序，它是无法找到的，至少经过整个宇宙的寿命周期无法找到。但是如果我们从一个有高度冗余的程序入手，然后逐步对其进行压缩，然后得到一个 1000 比特的最优程序，这样如何呢？用这个办法可以得到最



优程序吗？没有人能回答这个问题，但我敢说这不大可能。我有一种直觉。得到一个有高度冗余的程序并不难。我们如果不在乎程序的长度，就能写出无数个能完成同样任务的程序。而且这些程序比最优的程序要稳定，程序代码的微小变动带来的只是程序执行中的微小变化。例如，我们用一个子程序执行某个任务，而且，往整个程序中加入这个子程序的副本不会对整个程序的运算带来多少影响。这样，某个子程序副本代码的改变不会改变整个程序的功能，因为还有另外一个副本可以进行同样的运算。同时，发生了变化的子程序可以“探索”新的可能性。因此有冗余的算法可以很顺利地得到改进。假设第一个好程序的长度是最优程序的2倍。最优程序的长度为 N ，那么该程序的长度就是 $2N$ 。然后我们设想一下渐渐把这个较长程序中的冗余去除。我们试着从一个长度为 $2N$ 的程序开始，删除随机选择的1个比特，然后再随机调换一下其他的一些比特，想办法得到一个较原始的程序少1个比特的可用程序，长度可以表示为 $2N-1$ 。然后再调整这个程序，试着得到一个更短的程序，长度是 $2N-2$ 。如此进行下去，直到我们得到一个长度为 N 的最优程序。

我认为这里存在一个根本的漏洞：这个一步步寻找最短程序的过程必须是建立在这样一个基础上，即每当我们缩短1个比特，每个这样的步骤都应该能够帮助我们找到下一个更短的程序。但是当我们一步步做下去，得到的程序越来越短，它们的冗余也就越来越少，随机性越来越大。这样一来，越往后的程序就越脆弱，越难以通过随机变化得到改进。越往后的程序提供的寻求下一个更短程序的线索也就越少。我敢打赌，当邻近最短程序的时候，当已经得到长度为 $N+1$ 的程序的时候，它不会提供任何线索，帮助我们找到长度为 N 的最短程序。虽然优秀的数学家也许能证明这个想法，我个人并不知道它正确与否。所以我的判断对于数学家来说只能称作“假说”。随着我们越来越接近最



短的那个程序，对它的寻找就会变得完全随机，早先的带有较多冗余的程序所提供的线索在这里都用不上。如此一来，就无法通过进化过程获得最短的程序这么一种复杂的系统。

从此例可以看出，认为并非所有的复杂系统都能在合理时间内通过适应性搜索来得到，那是不正确的。某些带有冗余的系统，我们可能并不了解，但它们肯定存在。这些系统是一些典型的能够通过进化过程获得的复杂系统。例如斯坦福大学的约翰·科查(John Koza)正试图编制一些能进行比较复杂的运算的计算机程序。约翰发现，他编制的这些程序正是生物学家期望在生物体上看到的那种小巧别致的特性。它们绝未经过高度压缩，而是具有高度的冗余，且方式各异，我们对其知之甚少。在谈论过适应性地形结构及其对适应性寻找的影响之后，我们会回到这个话题作进一步的讨论。

究竟是哪些复杂的系统能够通过进化过程获得，这一问题不仅对理解生物学，而且对了解技术和文化的进化也有重要意义。我们所制造的最为复杂的物体往往对极细小的缺陷非常敏感：挑战者号航天飞机、失败的火星观测者计划以及电网故障引起大范围停电等，都属此类。这一问题表明我们正面对一个棘手的问题，在漫长的时间长河中地球上的生命一直面对这个问题：如何制造出复杂的系统而又不走到崩溃的边缘。也许存在一些基本原则，指导生物体在无限的可能性中进行搜寻并完成进化的过程，这些原则也将能帮助我们设计或者制造出更为稳定的系统。

地球上的生命

我们先回到地球的本初阶段，第一个地质时代。在足足 30 亿年的时间里，生命的律动一直很平稳，处于等待状态。在这 30 亿年的时间里，细菌完善了其分子结构，在亿万个池塘、缝隙以



及火山口里繁衍生长。我相信，当时地球上的生命都经历了一个分子形态的激增过程。早期的生命形式将其新陈代谢相互联系起来，互相交换分子形态、毒素、营养物质和简单的代谢废物，创造出千变万化的分子形态并传播开来。在这 30 亿年的时间里，发生了一些对后世具有决定意义的小变化。根据某种现行的理论，有核生物开始出现，它们将获取的细胞组成细胞器官：如叶绿体、线粒体，促进光合作用和新陈代谢。据加利福尼亚大学洛杉矶分校（UCLA）的布鲁斯·拉尼加（Bruce Runnegar）的研究，最早的有关有核细胞的细胞器官存在的证据是从距今有 21.5 亿年的岩石中发现的。这些螺旋状生物体有复杂的带状花纹，长度可达 0.5 米（图 8.1）。拉尼加认为这些物种可能是巨大的单细胞生物，与现代的伞藻（*Acetabularium*）相似（图 8.2）。谈及伞藻的复杂形态，以及该生物茎端精巧的伞状冠盖，以及其他具有多种生命形态和复杂生命循环的单细胞生物，胚胎学家兼理论生物学家路易斯·沃尔波特（Lewis Wolpert）说道：“现代的真核细胞已经具备了生存所需的所有知识。从真核细胞生物之后，生命一直在走下坡路。”路易斯说这话的含义是，形成多细胞物种所需的一切，都已经包容在真核细胞里了。

从这里大家可以认识到，细胞需要学习，才能构成多细胞的物种；另外，它们同样需要学习，才能构成单个的生命。生命个体的进化并不容易，因为当生命体死亡的时候，大部分的细胞也会死亡，使它们没有机会长生不死，像细胞一样永远分裂繁殖下去。构成生物本体的细胞是要死亡的。只有生殖细胞，因为能够产生精子和卵子，有机会获得永生。多细胞物种的起源，也就是生命个体的形成一直困扰着我们：一群基因相同的细胞，究竟是如何学会构成多细胞物种的？个体相对于群体，究竟在哪些方面具有优势，这是我们遇到的第一个具有普遍意义的难题。耶鲁大学的布斯（Leo Buss）一直潜心研究生命个体的起源这个难题。

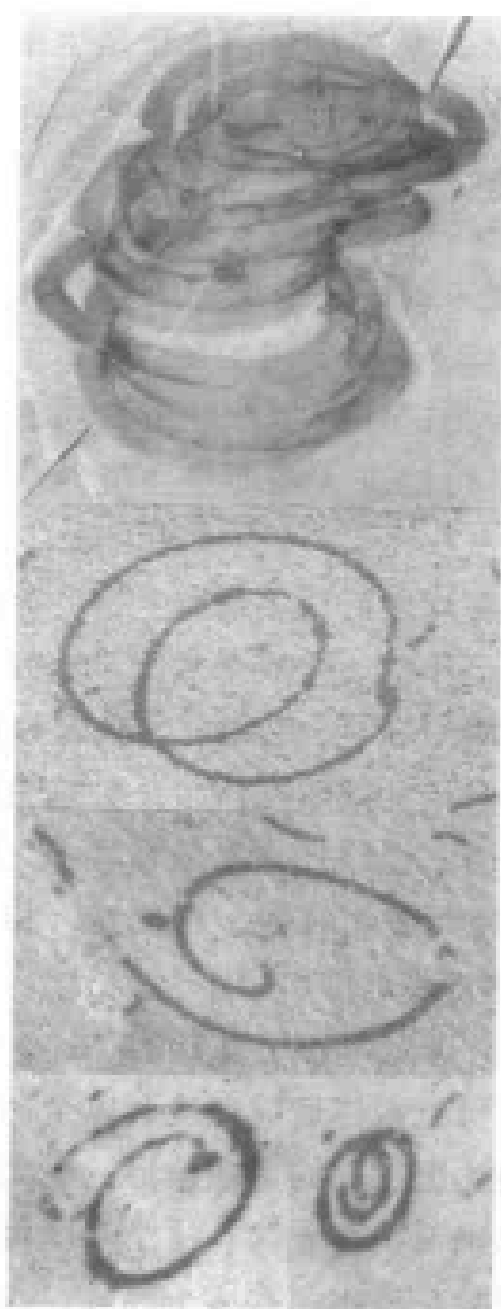


图 8.1 远古的祖先。这是已知最早的生活在 21.5 亿年前的真核细胞卷曲藻的化石。这种藻类可以进行光合作用。（感谢布鲁斯·拉尼加提供图片）



图 8.2 *Acetabularium*（碟状蓝藻），一种具有复杂形态和生命周期的单细胞生物，有可能和早期的真核生物类似。成体的高度为 1~5 厘米。（感谢布莱恩·古德文提供图片）

自然选择钟情于具有较高适应性的生命个体。如果这个世界充满了通过分裂繁殖的单细胞真核生物，并且我也是其中之一，那么我选择和其他的细胞一起，构成一个多细胞生物，而最终结果却



是死亡。这对我有什么好处？如果多细胞生物体内仅仅是生殖细胞才有机会留下后裔，历经千秋万代，而其他的细胞都注定会化为尘土，这些注定要死亡的细胞怎会满足于如此的命运？就多细胞物种的个体来说，答案是基本明确的。因为生命体内所有的细胞都有相同的基因，从基因的角度来说，所有的细胞就是相同的。即便是生命体中的大多数细胞都将死亡，仅生殖细胞留下后裔，对物种的存在也是有利的，因为这样的物种能更成功地把基因代代相传。多细胞的生物更有可能进入新的小生境并留下后裔。

早在 5.5 亿年前寒武纪物种大爆炸之前，多细胞生物的分布就已经很普遍了。在 7 亿年到 5.6 亿年前，构成寒武纪早期的生物，是文德期生物和埃迪卡拉（Ediacrian）^①生物群，这是以澳大利亚的一个地方命名的。拉尼加和他的同事发现了一种蠕虫状的生物，躯体柔软，高度为 1 米左右，盘绕在古老的岩层中（图 8.3）。紧接着就出现了寒武纪物种大爆炸时期，再往后，相比于 40 亿年的地质历史来说，就是非常晚近的事了。

生命有 34.5 亿年的历史，不论是简单还是复杂的物种，都在不断调整、积累有用的变异，变得越来越适应环境，以至达到最为适应的高峰。然而我们无法描述出它们的适应地形，也无从知晓进化的过程对于这个适应地形来说是否成功。这个环境可能非常平缓，只有一个高峰，也可能复杂崎岖，有多个高峰，甚至是完全随机，没有规律。进化就是利用变异、重组和自然选择在

① 埃迪卡拉（Ediacrian）动物群是斯普里格（Sprigg）于 1947 年在澳大利亚中南部 Ediacara 地区的庞德砂岩层中首先发现的。最初人们未能确定这一动物群的时代，后来终于确定为前寒武纪，年龄为 6.7 亿年。埃迪卡拉动物群包含三个门，19 个属，24 种低等无脊椎动物。三个门是：腔肠动物门，环节动物门和节肢动物门。水母有 7 属 9 种；水螅纲有 3 属 3 种；海鳃目（珊瑚纲）有 3 属 3 种；钵水母 2 属 2 种；多毛类环虫 2 属 5 种；节肢动物 2 属 2 种。——译者注

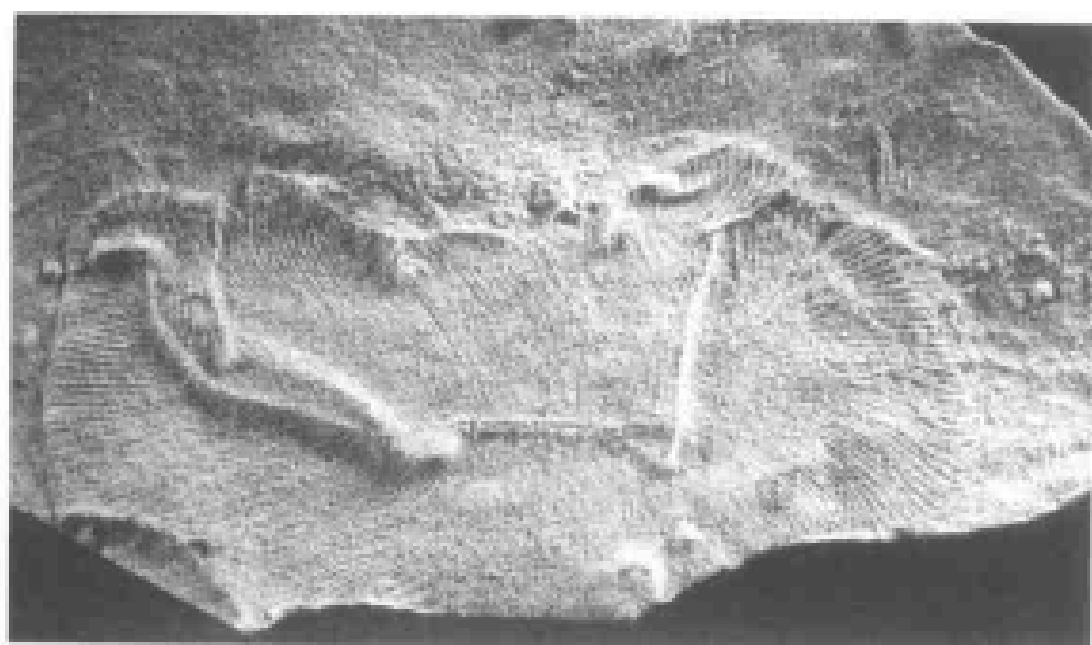


图 8.3 一种早期的类似爬虫的生物，*Dickinsonia*，长约 1 米，生活在约 7 亿年前。（感谢布鲁斯·拉尼加提供图片）

这样的环境中摸索前进。但是正如我们从寻找最大压缩程序的例子中所看到的，这种寻找有可能无法找到最高峰。或者是在一个比较平缓的环境中，即便是找到了高峰，物种在积累变异的过程中也可能发生我们前面提到的灾难性错误。这样物种就有可能从顶峰跌落，丧失所有的有用变异。很明显，生物不屈不挠，通过自然选择不断适应的过程，并不像看上去那么简单。为了进一步了解问题的实质和其中蕴含的道理，我们需要回顾一下群落生物学的历史。

达尔文告诉我们，物种是由于自然选择作用于可遗传的变异而进化的。但是达尔文并不知道变异产生的根源。在达尔文之后半个世纪的时间里，进化中到底什么在发生变化并不为人所知。达尔文和其他一些学者认为存在一种“混合遗传特征”。孩子既像父亲，也像母亲。不论遗传物质是如何起作用的，他们猜测这其中存在某种混合和平衡的过程，就像把黄色和蓝色调和起来可以得到绿色。但是混合说带来了一个问题：经过多个世代，一个



杂交种群的基因变异就会消失殆尽。比如眼睛的颜色，如果本来是有黄色和绿色的，经过很多代，遗传性状相互混合，最后整个种群的眼睛就都会变成绿色的。不会再有变异可以被继承，也就不存在选择的对象了。

孟德尔对基因的研究最终解决了混合遗传假说面临的问题，不过他的理论经过了半个多世纪才真正为人所用，这里面首先是著名的数学家乔治·H·哈代（George H. Hardy）和生物学家W·华恩博格（W. Weinberg），之后是罗纳德·A·费舍尔（Ronald A. Fisher），剑桥大学一位年青的数学家。我们来回顾一下孟德尔对豌豆的观察，以及其中蕴含的遗传物质理论。孟德尔对精心选择的具有相反品性的豌豆进行了研究，比如一种豆子的表面可能比较粗糙，另一种光滑，等等。他发现粗糙和光滑的豆子的第一批后代只具有上一代某一方的特征，但是这两种特征，或者叫表现型，却会在第三代中重现。很明显，代表粗糙和光滑的遗传物质（现在叫做基因）是代代相传的，中间不发生变化。

20世纪早期，人们已经知道携带基因信息的是细胞核里的染色体。人们更进一步了解到许多影响生物性状的基因位于每条染色体的片断中，而且其中许多基因，比如负责“粗糙”和“光滑”的基因是成对的，现在称之为等位基因。基于以上认识，哈代和华恩博格向我们揭示了杂交的种群不会出现等位基因混合的现象。相反，相对的等位基因，又称作基因差异，会一直存在于杂交种群中，等待自然选择的作用。

孟德尔规则为费舍尔的研究开辟了道路，使他能够提出一个根本性的问题：假设一个生物种群的某个基因有两个等位基因，比如是A和a——对应于蓝眼睛和棕色眼睛——而且基因A比a具有更大的选择优势，那么在自然选择的作用下，该种群中基因A的出现比率是否会不断增加呢？这个问题的答案必须是肯定



的，否则达尔文的进化论就不成立了。

费舍尔、J·B·S· 荷尔丹 (Haldane)，和舍沃·怀特 (Sewall Wright) 所获得的答案可能是肯定的。达尔文的理论能够成立。为了获得这个肯定的答案而确立的基本条件，奠定了现代群体遗传学的基础。然而这个答案也取决于种群所要努力适应地形的结构：它究竟是平缓的、只有一个高峰，还是复杂不平有许多的高峰，或者是完全随机，没有规则。对于这个地形，以及生物在此地形中所进行的探索的功效，我们所知尚少。基因突变、重组和选择究竟在何时能达到高峰？简而言之，在达尔文的开创性研究过去 140 年之后，我们仍不知晓自然选择的能力和局限所在，不知道进化究竟能够造就出什么样的复杂系统；甚至，我们至今还无从着手，去了解自然选择和自组织如何共同作用，创造出夏日午后高山草甸上鲜花盛开、草长虫鸣的胜境，和这个人兽共处的世界。

基因型空间和适应性环境

现在我们就着手详细讨论适应性地形的简单模型。这些模型仅仅是开始，但它们却已能揭示出自然选择的能力和局限。

人类和其他高等植物和动物一样，具有两套染色体，一套来自母亲，一套来自父亲。细菌只有一组染色体。细菌的典型生殖方式是分裂，它们没有父母，没有性别区分。（这种说法并不完全正确。细菌有时候也交配，交换基因物质，但是在下面的讨论中，我们完全可以不管细菌的这种性活动。）大多数的群体遗传学研究的是双染色体杂交种群，然而我们准备集中讨论的是单染色体种群，比如细菌，而且暂且不讨论它们的交配。这种限制使我们能够想象出适应性地形的大体模样。稍后我们将在讨论中增加双染色体和杂交等复杂因素。



为了能够说得更为具体，我们先假设某单染色体物种有 N 个基因，每个基因都有两种等位基因 1 和 0。因此可能出现的基因型就是 2^N 。生活在肠子里的埃希杆菌有大约 3000 个基因，因此它的基因型就有 2^{3000} 或者 10^{900} 种。即使是支原体（PPLO），以及 pleuromona（一种最简单的非寄生生物），基因数仅有 500 到 800 个，其基因型的数量也会达到 10^{150} 甚至 10^{240} 。现在我们可以考虑一下双染色体生物，每个基因都是双份的。植物可能有 20000 个基因。如果每个基因都有两个等位基因，那么二倍染色体的数目就是母系和父系染色体的基因型数目——分别为 2^{20000} 个——的倍数，或者说大约 10^{12000} 个。很显然，基因型空间非常大；即使是一个长度中等的基因组，其基因型的数目也是天文数字。在任何时候，某个物种的任一种群，都只是代表了这一物种可能拥有的基因型空间的一个极小的部分。

自然选择的作用是挑选更适应的变体。这到底是如何发生的？考虑一下属于同一种的细菌的某个种群，里面的一个亚种带有基因 B，它使细菌呈蓝色；另外一个带有 B 的等位基因 R，它使细菌呈红色。假设在特定环境下，该细菌呈红色会更为适应。当生物学者说红色的等位基因比蓝色的更为适应，我们是指大体而言红色细菌比蓝色的更有可能分裂并留下后裔。用最简单的话说，就是红色细菌比蓝色的分裂、繁殖得更快。假设红色细菌分裂所需的时间是 10 分钟，蓝色的是 20 分钟。在 1 小时内，任意一个红色细菌都能进行六次分裂，繁衍出 2^6 个，也就是 64 个红色的后裔；而蓝色的进行了三次分裂，繁衍出 2^3 ，也就是 8 个后裔。随着时间的增长，红、蓝两色的细菌的数量都呈指数增长，然而红色细菌的指数增长级数要大于蓝色细菌。因此，在一个种群之中，不论最初红蓝两色细菌的比例是多少，只要最初至少有一个红色细菌，随着时间的推移，整个种群就会变成几乎全是红色细菌，蓝色细菌只占极小部分，而且蓝色的比例会越来越小。



倾向于红色的选择会增加 R 基因在细菌种群中的出现频率。这是自然选择的核心概念，用适应的等位基因代替不够适应的等位基因。

我漏掉了一个重要的细节。假设在最初的种群中只有一个红色细菌和许多蓝色细菌。那么红色细菌分裂之前也有可能丧命。运气糟透了。我说这话的意思是：进化过程中的波动和意外事件都有可能对整个过程造成影响。大略说来，只要开始有一定数量的红色细菌，那么它们在能够激增之前统统不幸死亡的可能性就会变得极小。一旦跨过了某个阈值，一般的波动就很难阻止剩下的细胞义无反顾地把细菌种群发展为红色菌的天下。

稍后我将讨论一个适应性生物种群在自然选择的驱动下在基因型空间的移动情况。希望大家记住我们讨论的细菌的情况。如果整个细菌种群起初完全是蓝色的，并且一直保持为蓝色，那就什么也不会发生。但是假设某个细菌体内的 B 基因碰巧发生了变异，成了对等基因 R。那个红色的细菌及其后代比其他细菌分裂得更快，最后还是要取代蓝色细菌。整个种群就会从带有对等基因 B 的基因型向带有对等基因 R 的方向移动。（确实，极小一部分蓝色细菌会仍然存在。然而，我们可以对实验加以调整，在恒化器中进行，里面保持恒定数量的细菌，添加培养液的时候，同时将废弃的培养液和废物去除。最终，所有的蓝色细菌就会被排挤出这个有限的细菌种群，剩下的只是红色细菌。）

前面我们介绍了适应性地形和基因型空间的概念，在考察自然选择对于生物圈物种的形成所起的作用效应究竟如何的时候我们将用到这些概念。那么，适应性地形到底是怎样的？这个地形的特点究竟如何能够决定进化过程的成与败？

假设我们可以检验每种基因型的“适应能力”，并以高低来判断这种能力。更适应的基因型相比而言就比较“高”。我们还需要引入另外一个重要的概念，即“相邻”基因型。设想某基因



型仅由 4 个基因构成，每个基因都有一对等位基因 1 和 0。因此它们可以构成 16 种基因型：(0000)，(0001)，(0010)……直到 (1111)。每种基因型和只相差一个基因的其他 4 个基因型就是“相邻”的，亦即(0000)和(0001)，(0010)，(0100)以及(1000)之间是相邻关系。图 8.4a 显示的是 16 个可能的基因型，每个都位于立方体的顶点，该立方体在数学界被称为四维空间布尔超立方体。布尔超立方体的维度正好和相邻基因型的数目相等。如果有 N 个基因，那么每个基因型的相邻基因就是 N 个，所有基因型总数为 2^N ，每个都位于超立方体的一个顶点。

现在我们考虑以下的特例：随机设定 16 个基因型的适应性，比如随机选取从 0.0 到 1.0 的十进制数。适应性最低的为 1，最高为 16。因此在这个特例中，我们可以给超立方体的每个顶点赋以 1、2、3 到 16 的值（图 8.4b）。

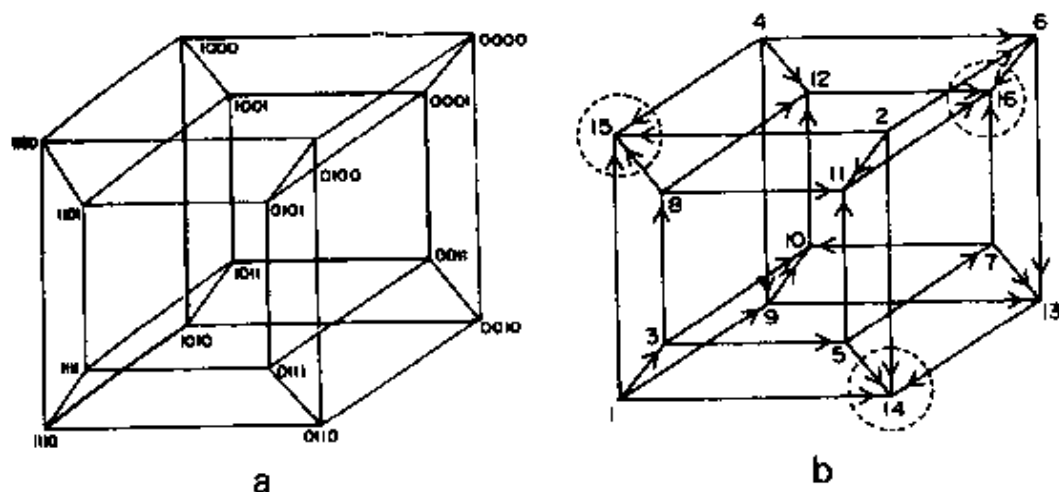


图 8.4 布尔超立方体。a. 包含 4 个基因的基因组的所有可能的基因型，每个基因型可分为两种，或称之为等位基因，我们将每一个看作布尔超立方体某个顶点。每个基因型都和周围的四个基因型相连，相邻基因型之间只有一个基因不同。因此 0010 和 0000，0011，1010，0110 相邻。b. 给每个基因型随机赋值，表示其适应程度，其中最低值为 1，最高值为 16。圈起来的顶点表示本地域内的最高值，表明此基因型比所有基因型相差为 1 的“邻居”的适应性都高。每个基因型出发的箭头指向的是更适应的基因型。



这样我们就得到了一个随机适应性地形。之所以为适应程度随机赋值，是为了使这个随机的地形和经过最大压缩的计算机程序的适应性高度相似。在这个例子中，改变任何一个数位，出现任何的突变，都会完全改变适应性地形的结构。

了解了这种随机地形和进化所起的作用的实质，我们就能更好地理解生物的差异、其地形的非随机程度、这种非随机性对复杂生物的进化产生起到何等重要的作用等等。从而我们有理由相信生物圈并不是由自然选择的单一力量创造产生的。进化需要非随机的地形。这种地形最根本的起源有可能是我们所探索的自组织原则。这里我解释一个自组织理论和自然选择理论相结合的一个侧面。

我们试着考虑一下适应性地形中的最简单的一个适应性进程。这个最简单的游戏的规则是：从一个顶点或基因型出发，假设有一突变的相邻基因——即随机选择一个基因，把它变成相对应的对等基因。如果变体适应能力更高，保留它；如果适应能力低，不要保留，重新随机改变另外一个相邻基因，如果适应能力更高则保留。

根据这一规则，我们可以用箭头表示从每个基因型向更加适应的发生突变的相邻基因（如果有的话）的进化。一个努力适应地形的种群，如果被放置在某一顶点上，也就表明它们具有相同的基因型，那么它们就会呆在原地。如果四个基因中的任何一个发生突变，且新的基因型更加适应，更适应的种群就会超越不适应的种群，因此整个种群就会发生变迁，从超立方体的最初的顶点向相邻的对应顶点移动。

因此，我们若是以高低的概念来衡量基因型的适应程度，则进化过程就可以被看成是从一个基因型向上攀登的过程。这样我们就可以讨论在随机地形下的进化之旅经历怎样的过程，进化为何困难重重。



进化过程的第一个最基本特点，是基因型首先攀登到最近的一个高峰。就像在群山之中的顶峰一样，这个高峰是附近地区所能看到的最高的，虽然实际上它可能比全球范围内的最高峰低得多。进化过程到达这个高峰之后会停下来。由于附近没有更高的顶峰，又找不到通往远处更高山峰的道路，它们会无所适从。在图 8.4b 所示的适应性地形中，附近有三个高峰。这里我们考察的是仅有 4 个基因、16 个基因型的微型图景。在非常庞大的基因型空间内，情况如何呢？附近会存在多少个高峰？

在随机的地形上遍布着地域性的高峰。这些高峰的数量令人吃惊，是 $(2^N)/(N+1)$ 。（实际上，想证明此结论很容易。任何一个基因型都有 N 个邻居，则此基因型成为 N 个基因型加上它自己当中适应性最高的可能性，即成为本地的高峰的可能性，为 $1/(N+1)$ 。由于一共有 2^N 个基因型，它们当中成为本地高峰的基因型数目的比例，就可以表示为基因型总数除以任何一个基因型成为本地高峰的机会。因此可推导出此公式。）这个小小的公式意味着随机进化地形可以包含多得无法想象的本地高峰。对于 $N=100$ 来说，其本地高峰的数量大约是 10^{28} ！

这样，我们就不难理解在随机图景中进行适应性搜寻为何异常困难。假设我们想通过登山来发现最高的山峰，很快我们就会裹足不前，停留在一个本地的高峰上。而本地高峰成为全球最高峰，其可能性与本地高峰的总数成反比。因此，即便是对于我们所讨论的非常普通的基因型，仅包含 100 个基因，而不是像人类那样拥有 100000 个基因，搜索起来也相当于在 10^{28} 个机会中，仅有一次有可能登上最高峰。对于随机的地形，通过攀登来最终找到最高峰是不可行的，因为这样就必须搜寻整个的可能空间。而这样做，即使是对于稍微复杂一点的基因型，所耗费的时间，也远远超过宇宙的寿命。

从某个地形的任意一点出发，适应性过程经过一定的步骤，



就能达到某个附近的高峰（图 8.4b）。这样，我们会提出这个问题：这种过程有多长。对于随机的地形，因为存在许多高峰，该过程的长度值不会太大（长度仅仅是 $\ln N$ ，这里 $\ln N$ 是以 e 为底求得的 N 的对数）。（对数是使某数等于一给定数而必须取的乘幂的幂指数，比如，以 10 为底的 1000 的对数就是 3）。因此随着 N 的增加，例如从 10 增加到 10000，基因型的数量就会有巨大的增长——实际上是呈指数增长，但是向最合适这一目标进化所需的过程，只增长了一点点（也就是从 10 的对数 2.3，增加到了 10000 的对数 9.2）。从月球表面图上可以看出，任何一点离本地高峰都很近，这使得某个种群陷于当地，难以找到远处更高的山峰。

实际情形比上面描述的更糟，因为攀登得越高，前进就越困难。图 8.4b 反映了适应性过程的核心特点。某一物种如果从较低的适应性开始出发，会有好多线路通向更高级别。每向上前进一步，线路都会减少，直到抵达本地的峰顶，就再也没有向上的道路了。这种前进路线不断减少的趋势，是不是存在某种规律？对于随机的地形，答案简单得令人吃惊。每当前进一步，向上的路线会减少一半。假设最初的数量为 10000，那么，我们从最不适应的程度出发，数量变化依次为 10000，5000，2500，1250……因此物种所处的位置越高，继续进化也就越困难。每向上一步，物种就需尝试 2 倍于实际存在的路线，而每前进一步所需等待的时间也就因此增加一倍：第一步只需尝试一次，第二步两次，然后 4 次、8 次、16 次，依此类推。到了第 10 步，就需要 1024 次尝试。到了第 30 步，就需要 2^{30} 次尝试！这种随着适应性不断提高，进化逐步放缓的倾向，是任何一个稍微复杂的地形的最根本的特征。在第九章，我将试图证明这种逐步放缓的倾向构成了生物和技术进化的主要特点。

我们来考虑一下试图在这种不友好的地形下进化的生物群落



所面临的另一种困境。随机地形中有大量的地区性最佳点，其中的一个是全球性的最佳点。如果一个群落能够选择各种可能的途径向上攀登，那么从起点开始，能够登上多少地区性的高峰呢？在随机地形上，不论适应性进程的起点在哪里，如果一个种群仅能向上攀登，那么它仅仅能登上地区性高峰中的极小一部分。随机地形和在新英格兰搭车有类似之处：你无法从一地到达另一地。一个种群试图在随机地形上进化，寻找最高的山峰，结果却陷在一个区域内，该区域与整个可能的空间相比只是很小的一部分。

在遍布着断壁危崖，群峰耸立的月球表面，没有任何线索告诉我们该去哪里，只有无数的本地区高峰，分布在广阔的可能性空间中。登山者沿任何上山小径，都只能登上很短的一段，然后就会发现自己站在一个不起眼的小山峰上，头晕目眩，这个小山峰是那么的渺小，相比之下，还不如夜空中的一颗小星星在群星中所占的比重。我们不论从哪儿开始向上攀登，都会被困在一个极小的区域内，永远动弹不得。

相关适应性地形

任何复杂的物质的进化过程都不曾在随机适应性地形上做过类似的事情。大家窗外的生物，它们的细胞，细胞里面的 DNA、RNA、蛋白质等，森林生态系统，高山草甸，或是草原，即使是我们赖以谋生的技术生态系统，其中例如有美国海军的标准操作程序、通用汽车公司的相关产品的标准生产流程、英国的习惯法、电信网络，所有这一切，其所在的进化地形，如果出现微小的“突变”，就可能引起规模或大或小的变异。

能进化的东西，如分子组成的代谢网络、单细胞生物、多细胞生物、生态系统、经济系统、人群等，都是在一个他们各自的



家当所在的地形里生存进化，使他们允许进化发挥作用。这些实际的适应性地形，构成了达尔文的渐变论的基础，它们相互联系。附近的点往往高度相似。较高的点较容易找到，因为地形会提供信息，告诉你该选择什么方向。与遍布断壁危崖，群峰耸立的月球表面不同的是，这些地形可能像内布拉斯加一样地势平整，像诺曼底的山丘一样平缓，至多不过像阿尔卑斯山区一样复杂。进化在这种地形上很容易取得成功。阿尔卑斯山令人生畏，但是与月球表面相比，就差得远了。只要手头有一个指南针，一个背包，简单的午餐和顺手的登山工具，你就能在一日之内登上勃朗峰并返回。这会是艰苦的一天，也是奇妙的一天，是真正的高地探险。

但是如果实际的地形是相关的，我们该如何着手研究它们？我们现在面临的问题是，如何建立有用的理论。随机地形的特征几乎完全是独一无二的，我们只是在基因型空间内对适应程度随机排列了一下。但是相关的地形又是怎样的？就目前我们所知，地形相关可能有无限多的方式。我们找到的方式，是否能带来有益的成果？

这个课题我一直不知道如何往下进行，直到几年前有一天，圣塔菲研究院的几个新朋友，其中包括来自亚利桑那大学的固态物理学家戴恩·斯特恩（Dan Stein），Duke 大学的里查德·巴尔默（Richard Palmer）和普林斯顿大学的菲尔·安德森（Phil Anderson），讨论起自旋玻璃（spin-glasses）。自旋玻璃是一种无序的磁性物质，安德森是首位使用模型来研究这种物质性状的物理学家。我将介绍的 *NK* 模型是物理学家的自旋玻璃模型的遗传学版本。*NK* 模型的特点是它可以明确显示出在复杂程度不同的地形中，基因型的特点会呈现怎样的不同，而且这个模型允许我们在一种可控状态下对一组地形进行研究。

我们需要再一次透过理论生物学家的抽象的眼镜来观察生物



体。我请大家想象某种生物有 N 个性状，每个性状有 0 和 1 两种状态。这两个值可能代表某个性状是“长鼻子”还是“短鼻子”，或者决定另一个性状是“O 形腿”还是“直腿”。因此某个生物就可以被看成是 N 个性状的 0 和 1 状态的组合。很显然，性状组合一共有 2^N 个，每个组合都是我们假想的生物体的一个表型。例如，一个生物可能有短鼻子和 O 形腿、长鼻子和 O 形腿、短鼻子和直腿、长鼻子和直腿等组合。我们将这些组合表示为 00, 01, 10 和 11。

生物的适应性取决于它的性状。假设我们想要了解这些按照性状组合，所有可能存在的生物的适应性，我们面临的问题是：在固定不变的地形中，某个性状对生物适应性的贡献，如短鼻子较之于长鼻子，取决于其他的性状，如 O 形腿较之于直腿。如果某个生物有 O 形腿，那么拥有短鼻子可能很有用，但是对于直腿的生物来说，有短鼻子就是有害的。（现实中更可能的情况是，粗大的骨骼对体积较大的生物更有用，而对于纤细敏捷的生物来说，则是有害的。）

简言之，某个生物的某性状的一个状态，对整体适应性的贡献，与其他许多性状的状态的关系非常复杂。如果我们考虑一个有 N 个基因的单倍体基因型，每一个都包括两个等位基因。一个基因的一个等位基因对整个生物适应性的贡献，和其他基因的等位基因存在很复杂的关系。遗传学者将这种配对关系称作基因异位显性和上位配对，意思是位于染色体上其他位置的基因，会影响到某个特定位置基因对适应性所起的作用。因此，若有两个基因 L 和 N，每个都有两个等位基因，L 和 l，N 和 n。基因 L 控制腿的性状：L 意味着长腿，l 意味着 O 型腿；基因 N 控制鼻子的大小：N 意味着大鼻子，n 意味着小鼻子。由于两个基因的等位基因控制着这些性状，而且大鼻子到底有用还是无用取决于腿的形状，因此每个基因的等位基因，对整体适应性所作的贡献，



可能取决于其他基因当时是什么等位基因。

我们可以将这种某些基因影响另外的基因对整体适应性所作的贡献的现象，看作是一个上位相互作用网络。不知大家是否还记得，第四章里我们提到，基因可以将其他的基因打开或者关闭。这里我们讨论的观点稍有不同。我们可以把每个基因绘制成一个节点，每个都和能影响到它的适应性的其他基因用线段相连。

NK 模型，描绘的就是这种上位配对网络，并反映出配对所产生的影响。通过把每个性状或者基因从 K 个其他性状或者基因所得到的上位“输入值”赋予这个基因，反映出异位显性。因此每个基因对整体适应性所作的贡献取决于自身的等位基因状态，以及影响这个基因的 K 个其他基因的等位基因状态。

基因之间实际的上位作用非常复杂。某个基因的一个等位基因，可能会大大增强另一个基因的等位基因对适应性的贡献，而它的另一个等位基因，却可能使得另一个基因的同个等位基因变得有害。遗传学者知道这种上位作用的存在，但是若想获取仅仅一个生物体内的两个基因之间的这种配对关系的细节，也需要进行非常困难的实验。而力图弄清楚上千个基因之间的上位作用，即便是对于一个物种也是不可能的，更不要说这么多物种了。

不过，多个因素表明，如果我们对这种作用以某种方式随机赋值，也许会能够令人满意地模拟出复杂的上位相互作用。首先，我们要承认，目前我们对这些生物现象还很无知。其次，我们是在力图建立一些通用模型，用来研究复杂、同时又相互关联的适应性地形，以便弄清楚这种地形的特征，以及地形的复杂程度和生物的特征有什么关系。如果我们对上位配对的适应性作用进行随机模拟，我们就能够得到所需要的通用地形模型。第三点，如果幸运的话，我们会发现，在某些情况下，实际的地形和



我们的地形模型非常相似。我们将会通过地形模型获得实际地形的正确数据。因此，也许不需要进行所有的实验来获得任何生物的上位配对细节，通过模型，我们就可以了解生物的异位显性和它对地形和进化的影响。简言之，通过建立模型，我们可以找到有关结构和适应性地形进化的一般性规律。

建立一个 NK 适应性地形模型的样例并不困难。对所有 N 个基因的每一个，分配另外的 K 个基因。这或是随机，或是以其他的方式选择产生。每个基因对整个基因型适应性的贡献，取决于它自身的等位基因是 1 还是 0，外加 K 个对它起作用的基因的等位基因是 1 还是 0。因此，这个基因对适应性的贡献取决于现有 $K+1$ 个基因的等位基因。因为每个基因都有两个可能存在的等位基因 1 或 0，可能存在的全部等位基因组合就是 $2(K+1)$ 个。我们用十进制小数为每个组合随机赋以 0.0 到 1.0 的值，以此表示该基因对生物体适应性的贡献。某个组合对适应性的贡献可能是 0.76，另外一个可能是 0.21。对所有的 N 个基因，和 $K+1$ 个影响它的基因所做的适应性贡献，都要随机赋值（图 8.5）。每个基因还和整个基因型的适应性有关，我将后者的适应性定义为 N 个基因对适应性的贡献的平均值。想弄清楚整个生物体的适应程度，把 N 个基因对适应性的贡献加在一起再除以 N ，就可得到。

这就是 NK 模型的全部。在图 8.5 所示的模型中， $N=3$ ， $K=2$ ，也就是说，该基因组含有三个基因，其中的每一个都受另外两个的影响。因此，这里每个基因对适应性的贡献取决于基因组中所有的基因，即它自身加上其他的基因。换句话说，这里的 K 是最大值。

图 8.5 所示的 NK 模型描绘了 2^3 即 8 个可能存在的基因型的适应性地形，每个都位于一个三维布尔立方体的顶点：(000)，(001)⋯，(111)。注意我们关于这个地形的所有想法都是可见

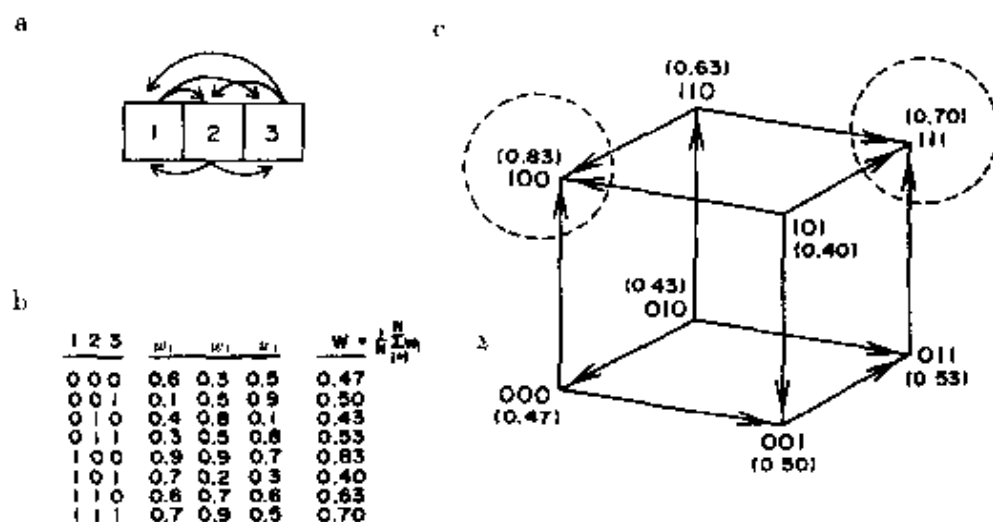


图 8.5 建立适应性地形模型。这个遗传网络的 NK 模型含有 3 个基因 ($N = 3$)，每一个都有 0 和 1 两种状态。每个基因都受到另外两个基因 ($K = 2$) 的影响。a. 两个赋值是随机的；b. 2^3 即 8 个基因组中的每个基因对适应性的贡献，其取值都是随机的，范围是从 0.0 到 1.0。因此每个基因组的适应性就是这三个基因适应性贡献的平均值；c. 这样，一个适应性地形就建立起来了。圈起来的顶点是本地域内的最高点。

的：选择不同的途径，可以到达两个本区域内的最高点；越往上走，可供选择的方向越少，等等。

我钟爱这个 NK 模型，根本的原因是：改变每个基因的上位输入值 K ，也就改变了地形的复杂程度和高峰的数量。改变 K 的值，就像转动一个控制钮。为什么？因为我们的基因之间存在上位相互作用的网络的生物模型，受制于互斥制约因素。 K 的值越高，即相互联系的基因越多，互斥制约因素就越多，其适应性地形也就越复杂，本地域内的高峰也就越多。

为什么增加 K 的值，就可以增加互斥制约因素，这很容易理解。假设有两个基因输入的 K 值在很大程度上相似。每一组等位基因组合对整体适应性所做的贡献都是随机赋值。因此，几乎可以肯定，基因 1 的上位输入值的最佳等位基因组合肯定和基因 2 的不同。由于存在互斥制约因素，只要他们的上位输入不存



在交叉耦合关系，几乎没有办法同时使基因 1 和 2 都尽可能的“幸福”。因此随着 K 值的增加，交叉耦合也会增加，相互冲突的制约也会更严重。

这些互斥制约因素使得地形复杂，充满高峰。由于有这么多的制约因素相互冲突，存在许多比较温和的一般妥协方案，但不容易找到特别优秀的方案。换句话说，就是存在许多本地域内的山峰，其海拔都不高。由于地形更加复杂，适应起来就更困难。回忆一下电脑程序的压缩问题，增加 K 的值，就像是增加程序的压缩程度。在这两种情况下，都会出现这样的情况，即一个很小的部分就会影响到整个系统。随着相互联系密度的增加，改变一个基因（或者是程序中的一个比特）都会影响到整个系统。这种系统要想通过对基因组稍做改变，以求获得适应性的细微改变，从而平稳地进化是很困难的。综合所有这些影响，随着 K 值的增加，群峰的海拔降低，数量增多，在此地形上进化就变得更加困难。

为了强化一下对不同地形的结构及其对进化能力的影响的直觉，我们把最初的控制值设定为 $K=0$ ，即每个基因都相互独立。不存在互斥制约因素，因为不存在上位输入，也不存在交叉联系。这个地形像富士山一样，中间一峰突起，地势向四周平缓下降。这很好理解。假设在不影响普遍性的情况下，碰巧每个基因的等位基因 1 的适应性更高。这样就得到了一个独特的基因型 (1111111111)，这显然是全球性的最高点。但是任何其他的基因型，如 (0001111111)，很明显可以通过依次将所有等位基因 0 改变为 1，攀登到全球性的最高点。更进一步，由于将基因型中一个基因的等位基因从 1 改为 0，只是使基因型的适应性改变了 $1/N$ ，因此邻近的基因型的适应性与之相差不会太大。因此高峰的四周很平缓。这个独一无二的高峰，往往离出发点很远。如果我们从任意一个基因型出发，可以预见，一半的基因为 0，另一半



为1。因此距离高峰有 $N/2$ 个突变，为整个空间直径的一半。而且每向上攀登一步，向上的方向就减少1个。如果我们从最糟糕的基因型出发，应该有 N 条上山的道路，接着是 $N-1$ 、 $N-2$ ，等等，直到适应性进程将我们带到全球性的最高点。这种上山道路不断减少的特点和随机地形形成了鲜明对比，在随机地形上，每向上攀登一步，向上的方向就减少一半。在这种只有一个高峰的平缓地形上，进化种群随机产生基因突变，选择更适应的基因型，很快就能到达富士山的顶峰。这就是达尔文渐变论的理想模式。

但是，假设那个 K 控制钮的方向旋到了另一边的最大值， $N-1$ ，结果是每个基因都受到所有其他基因的影响。当 K 增加到最大值 $N-1$ 时，适应性地形就是完全随机的（图 8.5）。这些都能理解。将任意一个基因改为它的另外一个等位基因，都会影响到这个基因本身和所有其他的基因。每个改变的基因，它对整体适应性所做的贡献就会有随机的变化，取值范围是 0.0 到 1.0。因为对于 N 个基因都是如此，则新的基因型，虽然只有一个基因变了，和原来的基因型相比，也发生了完全随机的变化，可能面目全非了。

由于 $K = N-1$ 地形是完全随机的，我们所提到的所有特点都会出现。该地形中有 $2^N/(N+1)$ 个最高点，因此当基因的数量比较多时，本地域内高峰的数量会是超天文数字。攀登上山峰的距离很短。不论从哪儿出发，一个进化系统都只能登上本地域内很少一部分高峰，这意味着这一进化系统会被冻结在它的可能性空间的很小的一个范围内。每向上攀登一步，前进的方向就减少一半，因此进步的速率随着系统适应性的增高快速下降。由于以上原因，这样的系统几乎不可能进化到最高程度。

K 的值从最低值 0 增加到最高值 1，就会随之产生一组相互关联的，同时也越来越复杂的地形。地形越来越复杂，山峰也增

多，但其高度却越来越低。这一点从图 8.6 可以看出，该图显示了随着 K 值的增加，本地域内一座山峰最邻近地区变得更加复杂。我建立 NK 模型的目的是，就是用它来研究这种复杂但又相关的地形。

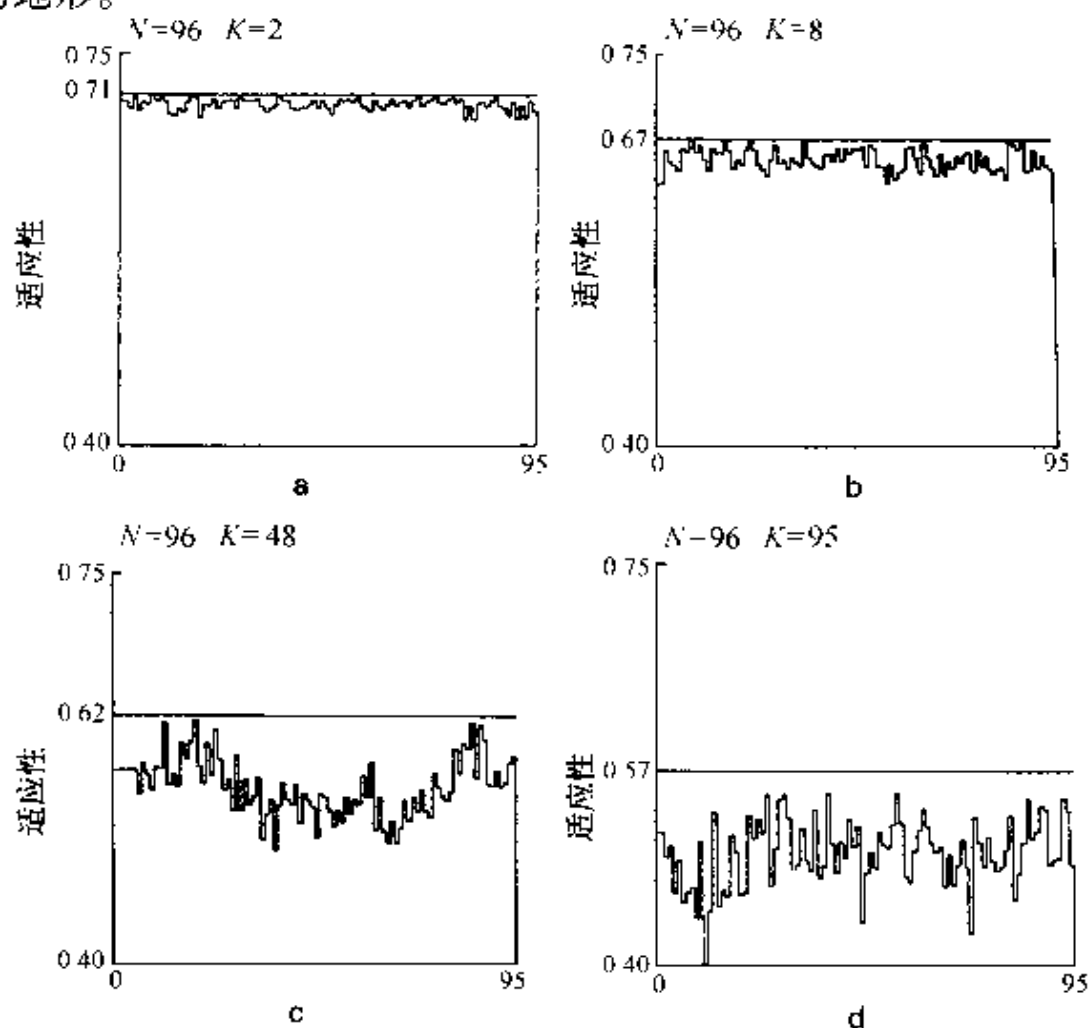


图 8.6 改变地形复杂程度。改变每个基因的输入值 K ，就可以调整适应性地形的复杂程度。本图中，在一座本地域内的高峰附近地区， K 值不断增加。从 a ~ d K 值越来越高；高峰所显示的适应性在降低，而高峰周围地区的地形则变得更加复杂。

复杂地形上的进化

实际的地形，既不会像富士山那样简单，也不会是完全随机的。所有的生物，以及各种复杂系统，复杂程度都是在介于 K



$= 1$ 的富士山地形和 $K = N - 1$ 的月球表面地形的中间，比较复杂，但并不完全随机。因此我们必须知道，这些复杂的地形是否存在一般性的特征，帮助我们加深对进化原理的了解。利用计算机仿真，我们可以像上帝那样俯瞰一个 NK 地形，观察下面所展现的大规模的特点。图 8.7 显示，当 K 值较低时，高峰会聚集在一起，就像阿尔卑斯山的群峰。这个地形中互斥制约因素很少，是各向异性的：在该地形上，山峰都集中在一个特殊区域。因此，进化的系统如能在可能性空间中找到这一特殊区域，会比较好。但是随着 K 值的增加，地形变得越来越复杂，高峰之间的距离不断加大，遍布地形的全部区域。因此在每个复杂地形上，高峰是随机分布在地形上的。出现这种情况，意味着地形变成各向同性的了：任何地区都和另外的地区相似。这也就意味着在各向同性的地形上，已经没有必要寻找布满群峰的区域，因为根本不存在这样的区域。

现在再看图 8.8，我们发现复杂程度适中的地形，都有一个引人注目的特点：通向最高山峰的出发点最多！这个结果很令人振奋，因为它可能有助于解释为什么在这样的地形上，进化过程搜索得最成功。在复杂（但不随机）的地形上，适应性进程容易登上更高的山峰，而不是较低的。如果一个进化种群多次随机“跳入”这个地形，每次都登上一个高峰，我们可以发现，在山峰的高度和进化种群尝试的次数之间有一个关系。如果我们把进化地形倒过来，转面寻找最低的山谷，我们就会发现，最低的山谷的流域面积最大。

最大一部分的基因型可以攀登上最高峰这一特点，并不是必然的。最高峰可能是一块低地上一个区域很小、很陡峭的山峰，周围有一些高度一般的山峰。如果一个进化种群被随机放于一点，开始攀登，它会发现自己陷在一个本地域内的山峰上无法脱身。我们刚刚发现的令人振奋的事实，是对于数量众多的复杂地

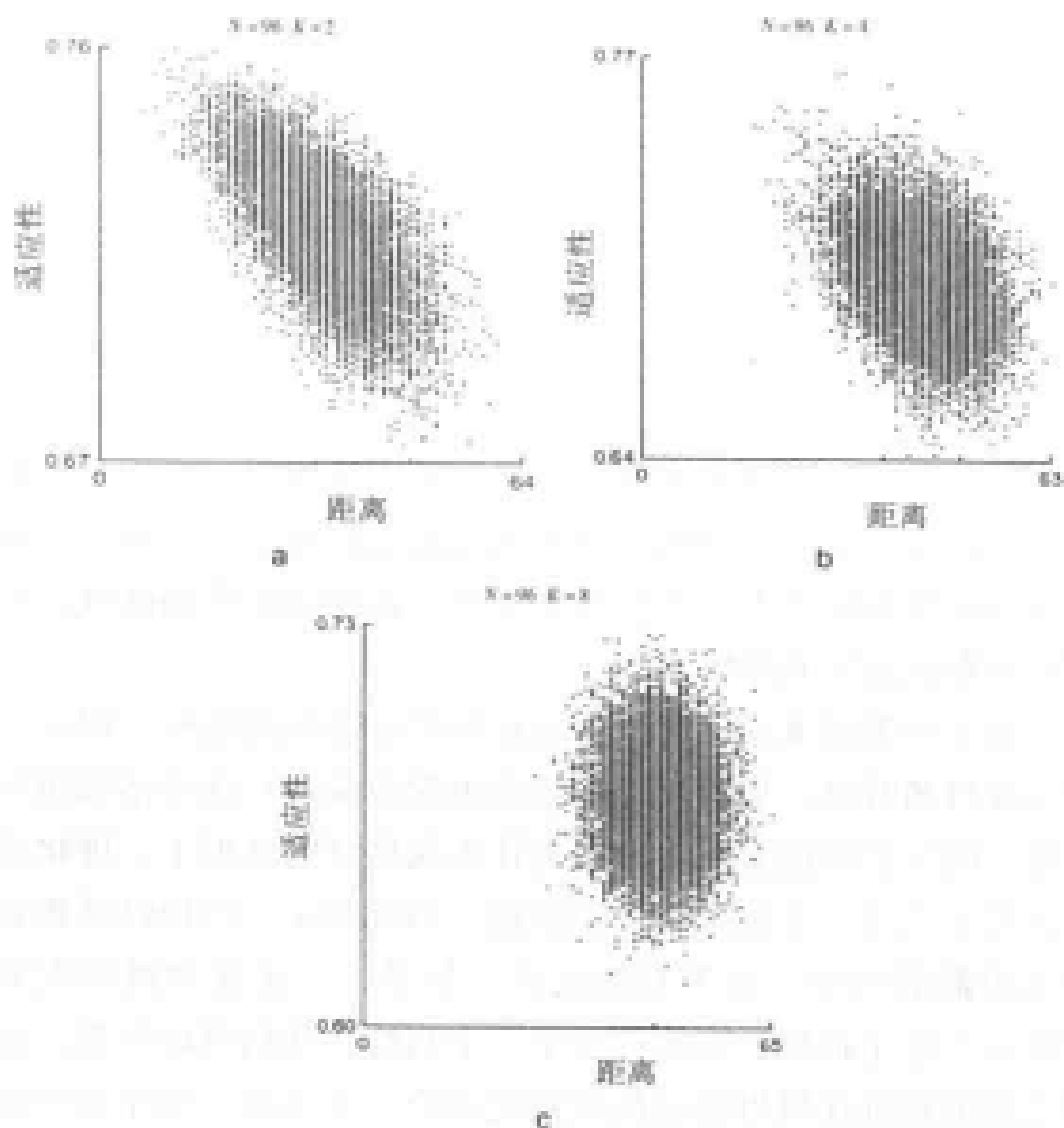


图 8.7 改变距离。本图显示的是每个高峰的适应性和离发现的最高峰的距离之间的关系。a. 如果上位输入值低， $K=2$ ，则高峰聚集在一起，该区域为从左上角到右下角方向排列的长方形。b. 当 K 的值增加到 4 时，高峰之间的距离开始增大，该区域接近垂直位于坐标中。c. 当 K 的值增加到 8，高峰分散位于整个区域，长方形垂直位于坐标中。

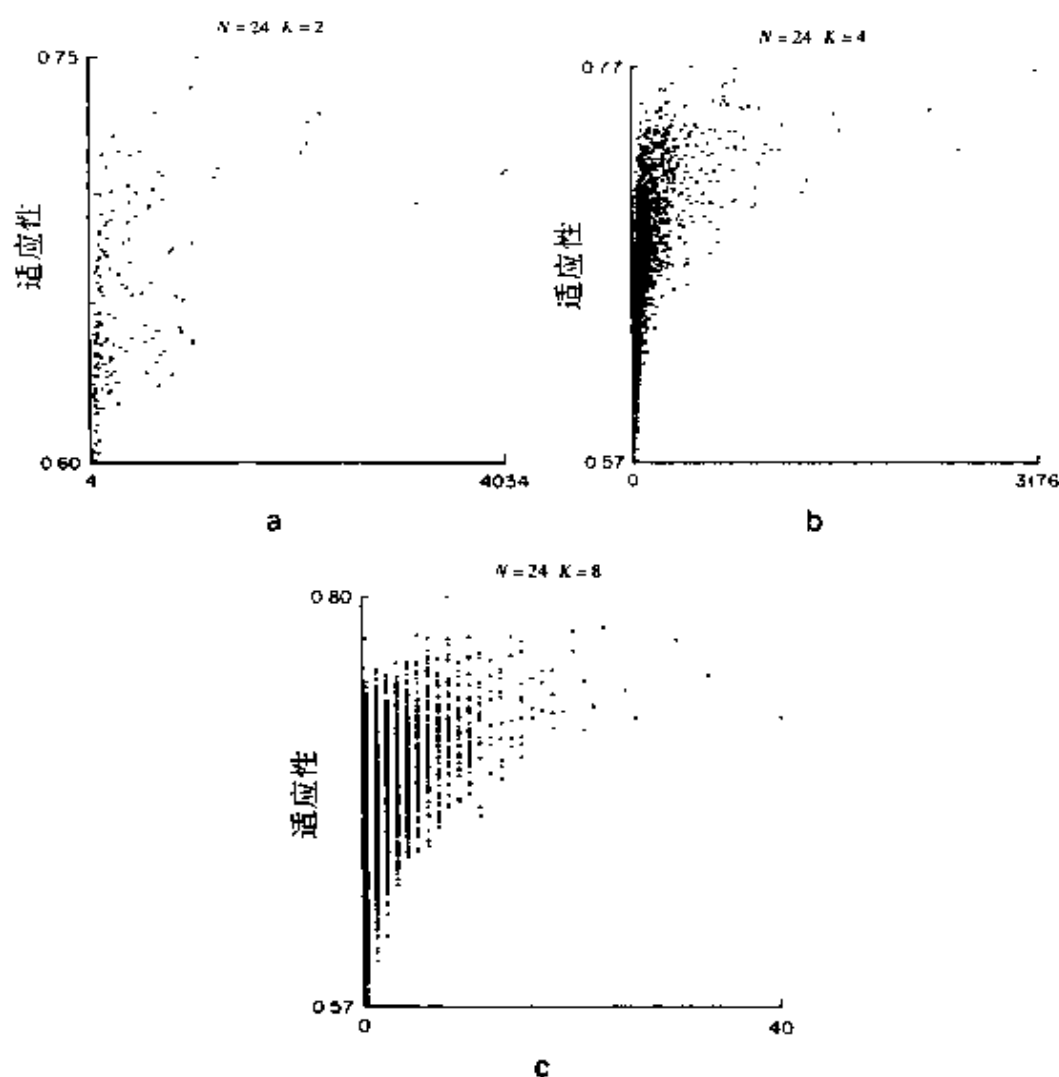


图 8.8 向更高处攀登。对于复杂程度适中的地形，能到达最高峰的起点最多。这一结论可以通过图中 K 的三个值显示出来：a. $K = 2$, b. $K = 4$, c. $K = 8$ 。

形，即 NK 地形系列，最高峰的“流域”面积最大。这可能是大多数复杂地形的特点，反映了其中存在复杂的互斥制约因素网络。因此，这可能是构成生物（以及技术）进化的基础的适应性地形的普遍特点。

回忆一下随机地形的另外一个引人注目的特点：每向上攀登一步，向上的方向数量都会减少一个常量，这个量是一半，因此保持进步越来越困难。类似的特点也存在于几乎所有的复杂程度



适中或非常复杂的地形上。图 8.9 显示的是不同的 K 值下适应性进程的邻近进程的减少比例（图 8.9a），以及对于不同的 K 值，找到更适应的变异所需的时间不断增加（图 8.9b）。如 K 值比较大，大约是 $K=8$ 或更大，每向上一步，往上的方向就减少一个常量，找到往上的道路所需的时间或尝试的次数也增加一个常量。这意味着，一个物种攀登得越来越高，寻找向上的道路不仅仅是更困难，而是异常困难，其困难程度是呈指数增加的。因此一个物种在单位时间内能做出一个尝试，进步的速率会呈指数下降。

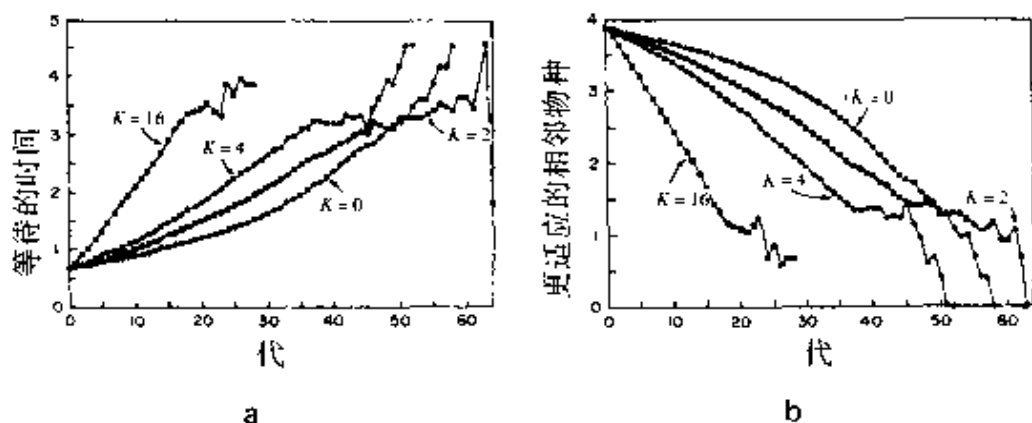


图 8.9 回报减少。在复杂地形上，每向上一步（适应性提高），往上的方向就减少一个常量，更适应的相邻物种也相应减少。a. 对于不同的 K 值，每进化一步（一代），寻找更适应的相邻物种所等待的时间或所需尝试次数的自然对数。b. 对于不同的 K 值，每进化一步更适应的相邻物种的分数的自然对数。

如果一个物种是在随机地形上努力攀登，寻找进步的道路，开始需要一次尝试，接着 2 次、4 次、8 次，依此类推，每前进一步，向上的道路就减少一半，所需的尝试增加 1 倍。因此改进的速率就呈指数下降。在比较平缓的地形上， K 的值比较大，每前进一步，向上的道路减少不到一半。但是进步的速率也会呈指数下降。随着上位交叉耦合 K 值的增加，地形越来越复杂，适应过程越来越慢。

我们刚刚看到许多复杂适应性地形的最基本的特点。随着物



种的进化，改进的速率呈指数下降。这不是简单的抽象总结。我们会发现，这种呈指数下降的趋势，是技术和生物进化共同拥有的特点。

为什么呢？因为生物进化和技术进化都是试图对充满互斥制约因素的系统进行优化。生物体、人造物体，以及组织都是在相关且复杂的地形上进化。假设我们正设计一种超音速飞机，需要确定油箱的位置，同时还得设计出牢固而又灵活的机翼以便达到所需载荷，需要在飞机表面安装控制装置，还要安装座椅，考虑空气动力性能，等等等等。对于某个部分的优化方案，可能和其他部分的优化方案冲突。这样，对于整个系统，就要找到妥协方案，以求解决不同部分互斥制约因素。与此类似，靠吃草为生的动物，也要合理分配时间和资源。但是在草地上行走的速度和搜寻食物所需的耐心是相冲突的。这些相互冲突的需求，怎样才能协同优化呢？一棵树可能会利用新陈代谢上的资源，制造出化学毒物，抵御病虫害，而不是将这些资源用来生长叶子进行光合作用。面对这个资源分配上的冲突，树木如何解决？生物和人造物品在复杂的地形上进化，都面临这种互斥制约因素。而这些互斥制约因素表明，随着进化的物种攀登得越来越高，进步速率会呈指数下降。

以上帝的目光俯瞰

我们作为这些模型的创建者，可以很容易俯察全局，纵览高山深谷，预测大范围的特点。但是处在这些地形中的生物体该如何呢？在我们所讨论的所有例子中，进化种群总是受到限制，它所能获得的有关如何在适应性地形上向上攀登的仅有线索，就是它眼皮底下所能见到的那一块。仅仅依靠基因突变和自然选择而实现的进化，会被限制在本区域之内，仅有本地域内的地形可供



参考。

如果一个进化种群能够像上帝一样俯看这个地形，了解其全貌，知道朝什么方向进化，而不是从目前所在的地方盲目地向上攀登，结果却陷入不太好的附近地区的山峰上。如果进化种群能够看得稍微远一点，又将如何？

噢，对了，它的确能够看得远一点。这里的答案也许就是“性”，这是一种我们还没有探讨的遗传变异。

为何会产生性别，是生物的最大谜团之一。我们知道，对于一个快乐的细菌，经过分裂，它的适应性仅仅和分裂速率有关。但是随着性的出现，就需要两个个体——父亲和母亲——才能创造出后代。这样，适应性一下子就下降了一半！为什么要这样呢？因为生物学者认为，性的演化使得遗传信息可以重组。这种重组为生物提供了像上帝一样俯看大范围的适应性地形的机会。

有性生物都是双倍体，而非单倍体。回顾一下，卵子含有母体的双倍染色体的一半，而精子会含有父体的双倍染色体的一半。这些信息都会被传递到受精卵上，重建双倍体的染色体数目。在卵细胞或精子细胞成熟的过程中，会出现减数分裂。母体一半的亲本染色体会被随机选择传递到卵细胞中。父体一半的亲本染色体会被随机选择传递到精子中。但是在亲本的一半染色体被选中之前，父母染色体在孕育卵子或精子的细胞内，就可能重新组合。比如拿产生卵子的细胞来说，该细胞含有一定数量的父母染色体副本。每一对父母染色体都依次排列起来。经过重组，两个染色体的同样位置出现了分裂，父本染色体的左段和母本染色体的右段结合起来，组成新的染色体，而母本染色体的左段和父本染色体的右段结合起来，组成另一个新的染色体。如果两个染色体的等位基因是(000000)和(111111)，且断裂出现在第二、第三个基因之间，那么重组的染色体可能是(001111)和(110000)。



性别如何为生物提供像上帝一样的视角呢？假设一个进化种群分布在某适应性地形的某区域内。处于该适应性地形不同地方的生物之间的染色体重组使进化种群得以窥探两个亲本所在地区的基因型。假设父母的染色体为(111100)和(111111)，那么交换前四个基因不会重组出染色体，但是却可以通过交换后两个基因重组出两个新的组合(111101)和(111110)。这里重组就是从两个亲本的基因型中取样。假设两个亲本的染色体完全不同，分别是(111111)和(000000)。在任何一点都可能出现重组，在第一、第二个基因之间，第二、第三个基因之间，等等。因此重组可以创造出很多不同的基因型，(111110)，(111100)……(000001)，所有这些都处于亲本所构成的基因型空间之中。

重组使得进化种群可以窥见适应性地形大范围的特征，从而寻找高峰。同样的大范围地形特征，对于进化的单倍体来说，可能是部分或完全不可见的，它们只能看到附近的地区。

假如适应性地形像阿尔卑斯山区那样，高峰都簇拥在一起，高峰的位置信息就会透露出关于更高山峰的交互信息。如果你处于一个高峰上，或在它附近，我在另一个附近，那么我们之间的区域就是寻找更高山峰的理想区域！这就好像是如果你在日内瓦，而我在米兰，我们之间的区域，肯定是寻找理想的滑雪场地的好地方。

另外，最高峰的流域面积也最大，那么重组也可以利用这一大范围特征。假如你我都生在高山附近，结了婚，赖重组所赐，在我们之间的某个地点生下了孩子，那么极有可能我们的孩子降生在一个不错的地点，已经具有很高的适应性，而且，更重要的是，他们可以从那里出发，攀登到更高的山峰！

撇开这个比方，假如一个种群通过简单的突变和自然选择攀登到了附近的山峰上，并利用重组探索种群个体之间的基因型空间，它就既可以利用附近区域，也可以利用大范围的地形特征取



得进化。适应性的提高可以大大加快。这正是我们的 NK 地形中所发生的，同时利用突变、重组和自然选择的种群，进化的速度大大快于仅使用突变和自然选择的种群。

这就难怪，大多数的物种都是有性的。然而我们的疑问只解决了一半。重组对于某些适应性地形，是极佳的搜寻策略，但是对于另一些来说，却是灾难性的。例如，对于随机地形，重组完全无效。事实上比无效更糟。假设你我都攀登上了本地附近的山峰，至少我们处于本地区的高峰上。我们如果试图重组，我们的子孙就会生在无人的旷野，而且一般而言，比我们的适应性要低很多。对于“型号不符”的适应性地形，重组的确是有害的。

如大多数物种都是有性的，因此也就要承受这么做所带来的双重适应性成本支出，那么，一般而言，重组应该是有用的。因此，也许物种内的互斥制约因素所导致产生的适应性地形，正好使重组有用，或者是自然选择使得生物物种具有了某种特点，使重组有用。

这两种可能，哪种是正确的呢？我不知道。我猜测二者兼而有之。我们将又一次看到进化的奥秘。自然选择在创造现有物种的过程中，可能也协助创造了这些物种生存演化所处的地形，选择了对进化最有利的地形，适于突变和重组的发生。可进化性本身就是个胜利。为了能从突变、重组和自然选择中获益，一个种群必须在复杂但同时高度相关的地形上进化。在 NK 地形模型中， K 那个“旋钮”必须精心调整。我们或许是非常非常幸运，拥有合适的上位联系密度，使我们得以进化，或者存在某种东西，能够调整那个旋钮。那些相信单纯自然选择是生物秩序的惟一根源的人，必须假定自然选择使得生物物种具有适当水平的上位联系，即适当的 K 值。但是自然选择是否有此能力，改变适应性地形的外观？或者，自然选择的能力有没有限度？如果自然选择无力保证进化的发生，那么这种可进化性是如何获得并维持



的？自组织是否从中起了什么作用？这是一个深刻的问题，有可能改变我们的思维模式。

自然选择的局限

如果原则上自然选择是万能的，那么生物的所有秩序都可能只反映出自然选择的作用。而事实上，自然选择是有局限的。这种局限使我们必须改变对于生物学和其他方面的思维模式。

我们已经见识到了自然选择的第一个重大局限。我们发现，达尔文所持的生物逐渐积累有用的变异而实现进化这一观点是一种渐变论。基因突变导致的必须是显型的轻微变化。但是我们已经看到在两种模拟世界中，这种情况不会发生。第一种就是对计算机程序进行最大压缩。由于这些情况是随机的，几乎可以肯定，任何改变都会使得程序的性能发生无法预测的变化。为了寻找少数几个最小程序中的某一个，我们必须搜寻整个可能性空间，即使是对稍微大些的程序，所需的时间就要比宇宙的寿命还要久远。因此，通过自然选择无法获得最大压缩的程序。我们的第二个例子是 NK 地形。如果上位耦合，即 K 的值非常高，接近最大值 $K = N - 1$ ，那么，该地形就会接近是随机的，并最终变成完全随机的。寻找最高峰，或是少数最高峰中的一个，就需要搜寻整个可能性空间。对于稍大一些的基因组，这根本是不可能的。

对于随机地形，情况更糟糕。如果一个种群只是靠突变和自然选择来进化，它就会陷在整个空间中一个极小的区域内，永远无法脱离出发的地点。它无法进行远距离搜索，寻找高峰。而如果这个种群敢于尝试基因重组，一般而言它会受害，而不是获益。

自然选择还有另一个局限。自然选择不仅对于随机地形无法



起作用，即使是在平缓的地形上，在渐变论的心脏地带——这是达尔文假想的立论基础——自然选择也无法起作用，彻底地无法起作用。自然选择会一头撞进“灾难性错误”中，积累起的所有有用性状都将丢失殆尽。

让我们重新回顾一下在复杂的适应性地形上进化的细菌种群的情况。该种群的行为特征取决于种群的规模、变异速率以及地形的特点。我们假设利用恒化器使种群数量稳定，并使地形特点保持不变，而把细菌突变的速率通过实验从低调高。这样会发生什么呢？假设开始时种群的基因性状相同，因此所有的细菌都处于基因型空间的同样位置。假如变异速率很低，那么经过很长的间隔，才会出现更适应的变异，并迅速遍及整个种群。这样该种群就是作为一个整体“跃进”到了更适应的相邻基因型。随着时间的流逝，该种群一直就按我们所预计的方式进化，稳定地向某个附近地区的高峰攀登，并停留在那里。

但是假如变异速率很快，导致在很短时间间隔内，产生了许多比较适应和不太适应的变异，又会是怎样的情形呢？那样，种群就会从出发点四散分布开来，从许多不同的方向向上攀登。更令人吃惊的问题是这样的：即便是该种群爬到了某个附近地区的高峰上，它可能也不会呆在那里！简单地说，就是变异速率太快，使得种群从高峰向四周“扩散”的速度，超过了选择更适应变异，以使种群回到高峰的速度。诺贝尔奖获得者曼弗雷德·艾根（Manfred Eigen）和理论化学家彼得·舒斯特（Peter Schuster）发现，由于种群不可避免地的高峰向四周“扩散”开，它所积累的有用的遗传信息就会丢失，因而产生一种灾难性的错误。

综上所述，随着变异速率的增高，该种群首先会攀登到附近地区的一个山峰上，并在周围地区盘桓。由于变异速率越来越高，种群会离开峰顶，分布在适应性地形的高度差不多高的山丘上。但如果变异速率继续增加，种群就会继续从高处下降，分布



在适应性很差的低地上。

艾根和舒斯特首先发现并强调了这些灾难性错误的重要性，因为这也给自然选择带来一种局限。变异速率高到一定程度，进化种群就无法把有用的基因变异积累起来，组成整体。相反，由突变引起的物种在基因型空间的扩散，超过了自然选择将种群聚拢起来，寻找适应性高峰的能力。

从另一个角度看，这个局限就更明显了。艾根和舒斯特还强调，如果每个基因的突变速率恒定，当基因型所包含的基因数量超过了一个临界值，灾难性错误的发生率也会增加。因此，突变和自然选择所能组织起来的基因组的复杂程度也是存在局限的！

因此，自然选择面临两大局限：在非常复杂的地形上，它会陷在附近区域内无法脱身；而在平缓的地形上，又会发生灾难性的错误，使山峰的高度降低，从而导致基因型适应性的降低。而对这两个局限，自然选择并不是毫无办法，因为它在塑造生物进化地形，决定地形的复杂程度时，可以起到一定的作用。我们已经见识到了其中的一些表现方式，因为从 *NK* 模型就可以看出来，改变基因之间的上位交互作用，就可以改变地形的复杂程度。但是由于自然选择的能力存在限制，它是否有能力为生物创造出友好的进化地形令人怀疑。也许我们需要寻找秩序的另外一种根源。如果系统中不存在某种内在的秩序，能够调整好适应性地形，并为自然选择提供立足之地发挥作用，也许进化就不可能发生。

我想这就是自组织和自然选择最根本的联系。自组织可能是可进化性的先决条件。只有那些能够自然地进行自我组织的系统，才能够进一步实现进化。从仅仅认识到自然选择过滤更适应的变异，发展到目前这个阶段，我们有了多大的进步啊。进化比我们以前认识的要微妙宏伟得多。



自组织、自然选择和可进化性

我窗外所展现的秩序从何而来？我想它来自自组织和自然选择。我们，注定要来到这个世界；我们，是造化的特殊眷顾。我们，是终极规律的产物，也是历史事件精雕细琢的产物。

这个复杂的整体到底是如何组织的？目前谁也不知道。但是生命这条绚丽的挂毯，比我们想象的要色彩斑斓得多。这条挂毯，是由偶然性的金线织就，而制作金线的黄金，是由充满奇思怪想的量子，兴之所至作用于核苷，加工而就，并由自然选择精挑细选。但是这条挂毯有整体的设计布局，织造中自有其节奏和韵律，反映出内在的规则，那就是自组织的规则。

我们该如何来理解这一新的结合？其实，我们目前也就仅仅希望能够“开始了解”这一切。我们进入了新的领域。刚刚在一块新大陆边上上岸，就自以为是，以为自己能了解它，未免太狂妄了些。我们正在寻找的，是一个尚不存在的理论框架。现有的科学体系，没有为我们提供任何现成的方法，帮助我们摸清并研究自组织、自然选择、机会和设计之间的错综关系。历史科学规则 and 传统科学，没有为我们提供足够的理论。

但我们正开始了解这幅挂毯的主题和纹路。第一个主题是自组织。不论我们看到脂质自然形成了双脂细胞膜胞 (bilipid membrane vesicle)，或是病毒自己结合起来进入低能量状态，或是松球叶序所呈现的菲波纳契基数，或是有序状态下并行发展的基因网络自发形成的秩序，或是在化学反应系统中某个转换阶段造就了生命的起源，或是生物圈的超临界行为特征，或是更高层次的共同进化模式，如生态系统、经济体系、文化系统等，在所有这些当中，我们都能看到某种规律在起作用。所有这些现象都体现出并不神秘，却是完全自发的秩序。我们开始相信这个新力量的



存在，开始感到它的能力。我们面临两方面的问题：首先，我们并不知道这种自发秩序的源泉自何而来；其次，我们面临的最大问题是难以弄清楚自组织和自然选择是如何交互作用的。

第二个主题是自然选择。自然选择并不比自组织更神秘。希望大家现在都能同意我所说的，自然选择具有很大能量，但也存在局限。并不是所有的复杂系统都能够通过进化过程而产生。我们必须了解，什么样的复杂系统能够通过这种方式产生。

历史事件的不可避免性是第三个主题。我们可以推理出水晶的晶体状态，因为水晶原子所能产生的空间形态是很有限的。我们可以推算出元素周期表，因为亚原子粒子的稳定结构相对也是有限的。但是一旦到达化学这一层次，分子形态的可能性空间要比整个宇宙中的原子数量还要多。既然如此，很明显，生物圈中实际存在的分子，实际上只占了分子形态可能性空间的极小一部分。因此，几乎可以肯定地说，我们看到的分子，多多少少是由于生命历史中的偶然事件造成的。可能性空间无比广漠，实有的难以穷尽可有的。在此之中，历史诞生了。

说出这些主题并不难，难以理清的是它们之间交织错综的关系。

但有一点是确定无疑的：进化过程若想成功，则它所搜寻的适应性地形相互之间必须有联系。什么样的实际存在的物理-化学系统呈现出达尔文的渐变论所假定的相关地形呢？虽然我无法给出详尽的答案，但是我们已经有了线索。达尔文的理论要求脂质泡囊应是稳定的。脂质、脂质混合体、脂质和非脂质分子或其中间状态，在其分子结构经过细微改变之后，脂质泡囊基本保持不变。这个泡囊就处于稳定的低能量平衡状态（在第一章，我们将其比喻为滚到碗底的小球）。虽然细节上有变化，其稳定形态能够保持不变，至少是大体上不变。自身结合的病毒、DNA 或 RNA 的双螺旋，或者是这些基因编码形成的蛋白质，都与之类



似。细胞和生物体充分利用这种稳定的低能量结构，认为这些系统形成的稳定结构比较“健壮”应该不会有错。

非平衡系统可能也很“健壮”。漩涡耗散系统，如果从其多样的容器外观、转速、流体种类以及流体的初始状态等因素所导致的漩涡时间长短这些角度来考虑，也是健壮的。系统构造规格、初始状态等的微小变化，会导致行为特征微小的变化。

漩涡是动力系统中的吸引子。然而吸引子可能稳定，也可能不稳定。不稳定因素由两方面引起。首先，系统结构的微小变化可能会导致系统行为特征巨大的变化。这种系统被看作是结构不稳定。另外，初始状态的微小变化，可能导致蝴蝶效应，可能引起系统行为特征的剧变。反过来，稳定的动力系统，其稳定因素也可能来自两方面。首先，系统结构的微小变化可能会导致系统行为特征微小的变化。这种系统结构是稳定的。另外，初始状态的微小变化，可能导致系统行为特征的微小变化。蝴蝶打盹儿了。

我们考察了稳定和不稳定的动力系统。大规模的布尔数学网络和我们讨论的遗传控制系统，既能处于混沌状态，也能处于有序状态，或是处于中间转换阶段，即混沌边缘的复杂状态。

我们知道，在动力系统的稳定性和其适应性地形的复杂程度之间存在明显的联系。处于混沌状态的布尔网络，以及其他多种混沌动力系统，结构上是不稳定的。小的变化会给它们的行为带来混乱。这些系统是在非常复杂的地形上进化。相比之下，处于有序状态的布尔网络，其结构的变化只能引起系统轻微的变化。这种系统是在相对较平缓的地形上进化。

从本章所讨论的 NK 地形模型可以看出，系统内的互斥制约因素的多寡和系统进化所处地形的复杂程度也有关系。我们一般相信，自然选择可以改变生物体及其组成部分，进而改变这些生物进化所处的适应性地形的结构。自然选择可以使遗传网络由混沌变得有序，使之更稳定。自然选择还可以通过调整基因的上位



配对关系，使地形结构由复杂变得平缓。通过改变某生物体内互斥制约因素的程度，自然选择还可以改变这些生物所探索的地形的复杂程度。

不仅仅是生物在进化，我们必须想到，生物所探索的地形的结构也在进化。由于在非常平缓的地形上，自然选择面临出现灾难性错误的危险，另外，在非常复杂的地形上，可能永远陷在某个极小的区域内，无法探索巨大的可能性空间，因此，我们不得不怀疑，自然选择是否能寻找“好”的地形。我们并不太了解何种地形算是“好”的，不过现在判断说这种地形肯定是高度相关，而非完全随机，应该不会有错。

然而，我们讨论过的自然选择的局限会带来另外的问题，即自然选择本身能否造就并维持这些生物，并使它们能在适于自然选择发挥作用的地形上进化。没有任何迹象表明，自然选择能够造就并维持可进化性。细胞和生物，难道不是天生具有某些特性，使得自然选择可以在它们身上找到立足点，发挥作用？另外，进化自身怎么能造就出可进化性，难道是自己拉着自己的鞋带跳起来的？

这样我们就回到一个亟待证明的可能性，即自组织是可进化性的先决条件，它造就的结构能够从自然选择中获益。这种结构能够逐渐进化，而且健壮，因为在自发的秩序、健壮、冗余、渐变论和相关地形之间，不可避免存在着关系。含有冗余的系统，其特性就是许多突变对其行为特征不会造成影响，或者仅造成很小的影响。冗余导致了渐变论。但是冗余的另一个代名词是健壮（robustness）。所谓健壮，就是指对于细微的改变，系统反应不敏感。脂质泡囊，或是有序状态下遗传网络的细胞型吸引子（cell type attractors）的健壮性，是冗余的一种反映。正是健壮性的存在，允许生物逐渐积累变异，对系统进行改进。因此冗余的另一个名字是结构性稳定，比如折叠蛋白质（folded protein）、



组合病毒（assembled virus）、有序状态下的布尔网络等，都是一种冗余。通过模拟可以观察到稳定的结构和行为特征。

假如这个观点大致上正确，那么能最好地利用自然选择的系统，就是自组织的、健壮的系统。这样，自组织和自然选择之间就不是必然存在根本性的冲突了。秩序的这两个根源是天生的一对，细胞膜是一种脂质膜，将近40亿年以来保持稳定，既因为它本身健壮，也因为通过自然选择这种形态具有可进化性。我相信遗传网络处于有序状态之中，或者是位于混沌的边缘，因为这种网络是事先结构好的，自具某种秩序，另外也因为这种系统具有结构和动力稳定性，因此它们在相关地形上进化，能够被塑造得适应新的任务。

但是，如果自然选择是通过利用自组织和健壮的特性而创造出生物，因为二者在进化中唾手可得，且同样的自组织特性也很容易创造出来，那么，我们就不再仅仅是敲敲打打造出的精巧玩意儿，或者复杂的分子机器什么的。不同等级的生命建筑材料，从分子、细胞，到组织，再到生物体，正是具有这个世界运行所呈现的健壮、自组织和自发的特性。假如自然选择只是进一步塑造了这些建筑材料的稳定的特点，那么这些系统所呈现出的自发的合理的秩序会在生物体内保存下来。不论自然选择如何过滤淘汰，自发的秩序之光都会透射出来。

自然选择是否超越了它本身构件的自发秩序？有可能。但是我们不知道其程度到底如何。自然选择所探索的形态越罕见、越不可能，它们就越不典型、越不健壮，而突变的压力也会增大，以便使生物回到典型、健壮的型态。我们猜测，这种自发的秩序，确实会显露出来。

因此我们就是秩序的中心。进化肯定有撞大运的成分在内，但同时也是内在秩序的反映。

我们，注定要来到这个世界。我们，有幸生于这个宇宙。



第九章 生物体和工艺品

生物起源于自然秩序和自然选择的巧妙融合，其手艺和智人制作石器的手艺并无二致。然而生物进化与石器制作相比，在规模、复杂性和所造成的影响等方面，以及所经历的时间跨度上迥然不同，但我们却不难发现二者之间的可比之处。

生命在时间和空间上辐射扩散。寒武纪物种大爆炸可以很好地证明这一点。随着多细胞生物的出现，一幅壮观的进化地形展现在人们面前。我们可以感到，当时多细胞生物是多么欣然地去尝试每一种可能的进化方向，那种率性大胆的探索，有如一出狂热的舞蹈。许多物种，好像是因着林奈氏分类系统图而生的，在一场规模巨大的实验中，迅速出现，并进一步演化变异。主要的变体也很快出现，构成了基本的“门”，继而，随着造物的更精细的加工，又出现了更下层的分类：纲、目、科和属等。其后，最初的爆发之后，狂欢过去，许多原初的物种消失了，许多形成不久的门类又不行了，生命逐渐趋于固定的样式，剩下了大约有 30 个门，如脊椎动物、节肢动物，等等等等，这些物种成了生物圈的主宰。

生物的这种进化场面，和技术进步真的有很大的不同吗？在技术进步中，是那些发明家做出最基本的创新。同样，我们可以看到，后来的补锅匠利用基本的创新，探索它们所带来的无穷的



可能性，做出多种多样的小改进。这些改进也是欣欣然而作的。而且，在盛宴狂欢之后，我们也会静下心来，对少数几种主要的设计进行更为精细的再加工，这些设计将主宰一段时期内的技术进化地形，直到这种技术趋于消亡。如今，没有人再去制作罗马人的攻城器械了。榴弹炮和近程导弹使这些器械不复存在。

类似的原理是否也主宰着生物和技术进化的主要方面？生物和人造器械的设计都受到互斥规律的约束。如前所述，这些约束创造了崎岖不平的（亦即复杂的）适应性进化地形。进化在探索适应性进化地形的时候，并不借助于某种本初的目标。而我们是有意地探索技术进步的可能性的，同时受到市场力量的制约。然而假如背后的设计问题导致技术革新也出现类似的复杂的进化地形，那么，断言相似的法则同时主宰着生物和技术的进化，也就不那么令我们诧异了。生物组织和泥盆瓦罐之所以出现，可能是受同一种深层的法则支配。

在本章里，我将探讨生物和人工器械共同存在的，能相互比拟的特点，但这一主题并不就此而止，而是贯穿本书后半部的所有章节。我所探讨的，是这两个相互联系的复杂地形的特点。我认为，第一个特点可以解释，为什么在最基本的创新产生之后，事物会朝着各个方向发展，发生令人吃惊的演化。而何以随之而来的进步，步调则会放缓。我们姑且称之为“寒武纪”生物变异方式。我将探讨的第二种情况，是每次进步之后，进一步发展的方向会逐渐减少。如第八章所述，进步的数量呈指数级减少。这一特点可以解释在技术层面上，为何会出现“学习曲线”，而在生物学上，进化也是逐渐减速。姑且称之为“学习曲线”性状。这两种情况，在我看来，都是这两种相关复杂进化地形的统计学特征造成的。



跨越进化地形

探讨此问题的时候，我将继续使用第八章引入的相关适应性进化地形的 NK 模型。这是第一个复杂的适应性进化地形的数学模型。虽然目前尚不明确，但我相信，我们将要探讨的特点，对于任何复杂但相关的进化地形都是成立的。我们已知 NK 模型产生出一系列不断增加的复杂进化地形 K ，每个“基因”的“上位”赋值也随之增加。而 K 的增加会带来相斥约束的增加。反过来，相斥约束的增加会使该地形更加复杂，崎岖不平，峰峦耸立。当 K 达到最大值（ $K = N - 1$ ，其中每个基因都是相互独立的），该地形也就是完全随机的了。

首先，我先来描述一种发生在相关的复杂进化地形中简单的、理想化的适应性进程——跨越式适应。我们已经考察过通过产生并选择单一突变而进行的适应性进程。现在要考察的，是一种在所有可能性当中逐步发展，坚定地朝向某个地域性高峰攀登的进程。不过我们暂时设想一下，如果同时产生大量的变异，一下子使物种的性状在许多方面发生改变，此种情形就可以被看作是物种在适应性进化地形中向前跨越了一大步。假设我们身处阿尔卑斯山而步履如常，则迈出的每一步，其落脚点的海拔都和初始位置紧密“相关”。当然，灾难性的例外永远存在，比如，说不准身后就是万丈悬崖。然而假设我们一步跨越了 50 千米，则我们落脚的地点，其高度和初始位置从根本上讲就是不相关的，因为我们这一跃，超越了该进化地形的“相关距离”的限度。

现在假设 NK 进化地形的 K 值比较适中，例如 $K = 1000$ ，且 $K = 5 \sim 1000$ ，每个基因的适应性能力都取决于另外 5 个基因。该进化地形犄角峥嵘，非常复杂，而同时又高度相关。邻近区域



的情况又相当类似。随意替换其中的 1 个、5 个甚至 1000 个基因，所得到的组合，其适应性和起初的没有多大区别。也就是说，我们没有跨越相关距离。

NK 进化地形的相关距离很明确。基本说来，这一距离表明该进化地形中的各点之间的距离，因此，了解了某点上的适应程度，就能够预计第二个点上适应性的某些情况。在 NK 进化地形中，该相关性随着距离的增加，呈指数级下降。因此，如作大步的跨越，比方说改变 1000 个等位基因里面 500 个的状态，就等于跨越了此空间的一般距离，那么我们会发现，目的地与出发点相比，其适应性指数是完全随机的。

一条非常简单的规则支配着这一跨越式适应进程。该进程正是模仿了在完全随机的进化地形中通过单独突变产生更加适应的变体过程。其结果是每当出现更加适应的跨越式变体，那么下一次通过跨越发现更适应变体所需的尝试，就要增加 1 倍。图 9.1 所示的就是这一结果。图 9.1a 所示的是在 NK 进化地形中，当 $K=2$ ， N 的值不同时，跨越式适应进程的结果。每条曲线起初上升很快，后来就慢慢放缓，而且是明显地呈指数级降低。（事实上，如果降低幅度的确是呈指数级，反映出每次进步所需尝试的次数都比上一次多 1 倍，那么我们把图 9.1a 中的数据用所尝试次数的对数替代，就可以得出一种线性关系。图 9.1b 显示这一判断是正确的。所需尝试的次数为 $S = \ln C$ 。）

此结果虽简单，但意义重大，且放之四海而皆准。跨越式的适应过程，超越了进化地形的相关距离，每前进一步，所需尝试的次数就要增加 1 倍，因此速度也就呈指数级降低。发现最初的 10 个更适应变体，需要 1000 次尝试；后面的 10 个，则需要 100 万次；在后面的 10 个需要的尝试则达到了 10 亿次。

（图 9.1a 同时显示了另外一个重要特点：如 N 增大，可能性空间随之增大，跨越式适应过程每经历同样次数的尝试，其结

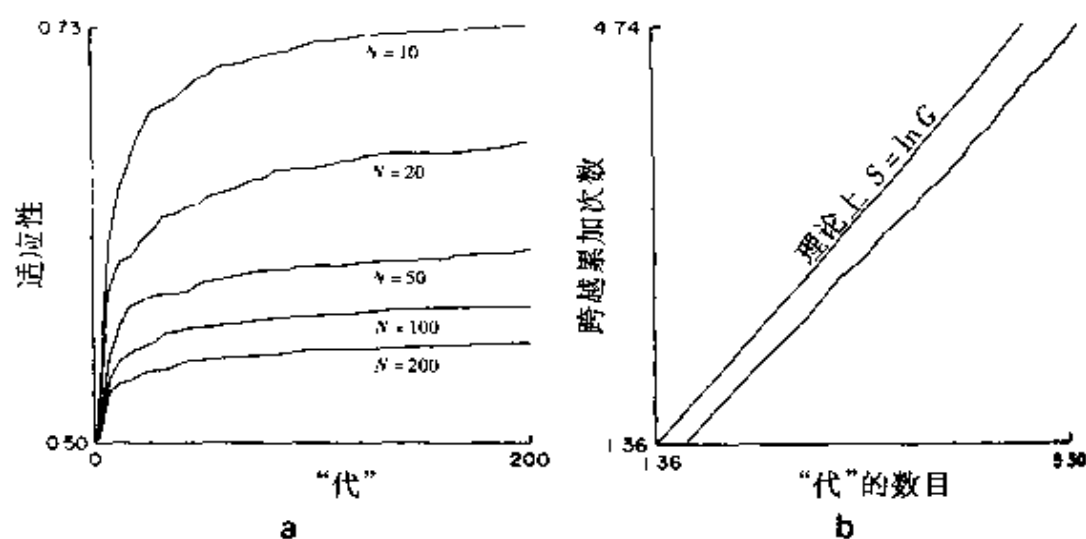


图 9.1 跨越式前进。生物每次发生突变的基因数超过一个，就能以某种跨越的方式穿过 NK 地形。但是在相关地形上，每发现一个更为适应的跨越式变体，所需尝试的次数就要加倍。起初适应性快速增长，后来逐渐降低，直到停滞。a. 该地形 $K=2$ ，显示了这种逐渐降低的趋势。所谓的“代”，就是每次跨越累加起来的次数。每个弯曲都代表 100 次前进的平均值。b. 本图所示的是改进的次数和经历的世代的关系。

果只能是随之变差。从其他讨论结果我们已知 NK 进化地形中高峰的高度不会因 N 的增加而变化。因此这种适应程度的降低，进一步限制了自然选择，我在自己撰写的另一本名为《秩序的起源》的书中，称之为复杂性灾变。随着基因数量的增长，跨越式进化的效果越来越差；生物体的结构越复杂，就越难于通过自然选择的积累实现有用的巨大变化。)

与之密切相关，决定跨越式进化的恒定法则决定了，在相关进化地形上产生的进化，可以分为三个时间段——此论涉及寒武纪物种大爆炸。设想某物种在一相关的复杂进化地形 NK 上进行进化，且初始的适应程度为一个平均值。因为起始位置的适应程度是一个平均值，附近的变体中，有一半比该物种适应性更强。但是由于进化地形的结构或外观是相关的，附近的变体只是比该



物种稍好一点。我们对比分析一下较远的变体。因为起始位置的适应程度是一个平均值，在这个例子中，附近的变体也是有一半比该物种适应性更强。但是由于远处的变体和该物种间的距离远远超过了该进化地形的相关距离，因而其中某些变体的适应程度大大高于起始点的物种（同理，远处另外某些变体的适应程度也可能远远低于它们）。假设，某物种在进化过程中，突变导致变体的出现，如果它们和原来的物种只是有个别基因的差异，进化过程仅需搜索邻近地区；如果许多基因发生改变，就需搜索较远的地方。假设最适应的变体能以最快的速度波及整个种群，就有可能出现这种现象：在进化过程的早期，较远的变体，由于比近处的变体更为适应，会主导整个进化过程。如果处于进化的种群的发展方式有一种以上，就会出现分支进化过程，物种本来的基因型的某些较远的变体，它们相互之间差异也比较大，会更快地发展。因此在早期，差异较大的变体就会发展起来。正如在寒武纪生物大爆炸中，相互之间有显著差异的物种，即我们称为“门”的那些物种，最先出现了。

接下来是第二个阶段：随着较远的更适应的变体产生，跨越式进化的普遍规律就会起作用。每当找到一种更为适应的变体，找到下一个较远的适应变体所需的尝试，或者所需等待的时间，就要加倍。最初 10 个进步可能需要 1000 次尝试，下 10 个就需要 100 万次，再往后是 10 亿次。由于寻找较远的更适应变体越来越难，也越来越慢，那么从本地山峰上找到更适合变体就会更容易。为什么呢？因为此种情况下，附近的更适应变体减少的速率要比跨越式进化中的速率降低得慢。简言之，在进化的中期，进化中的分支种群会开始攀登本地的高峰，寒武纪生物大爆发中所发生的情况正好也证明了这一点。主要的物种都出现之后，大幅度的创造活动放慢下来，小修小补开始了。进化活动开始集中在附近的区域，对它的创造做点錫锅补盆、打制金银首饰之类的



精细活。

长远来看，即在第三个阶段上，种群可能已经进化，达到当地的最高峰，停顿下来；或者像在第八章讨论的那样，在变异比率较高的情况下，在高度适应的“山脊”上飘荡不定；或者进化的地形发生改变，适应性的高峰发生了变化，生物则循着变动的高峰继续演化。

最近，我和比尔·麦克里迪（Bill Macready）决定利用 NK 地形深入探讨这“三个时间跨度”。比尔所做的工作，是对进化过程在进化地形中的前进距离进行数理计算。图 9.2 显示的就是他的计算结果。

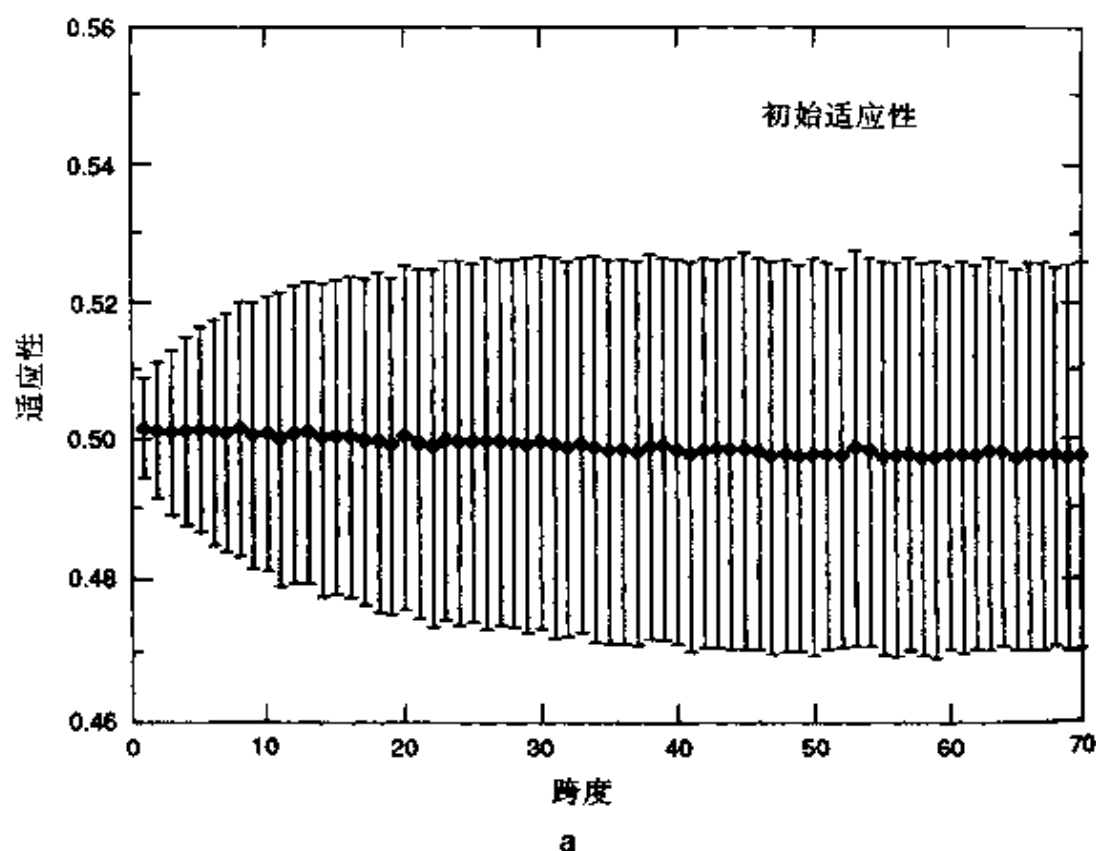


图 9.2

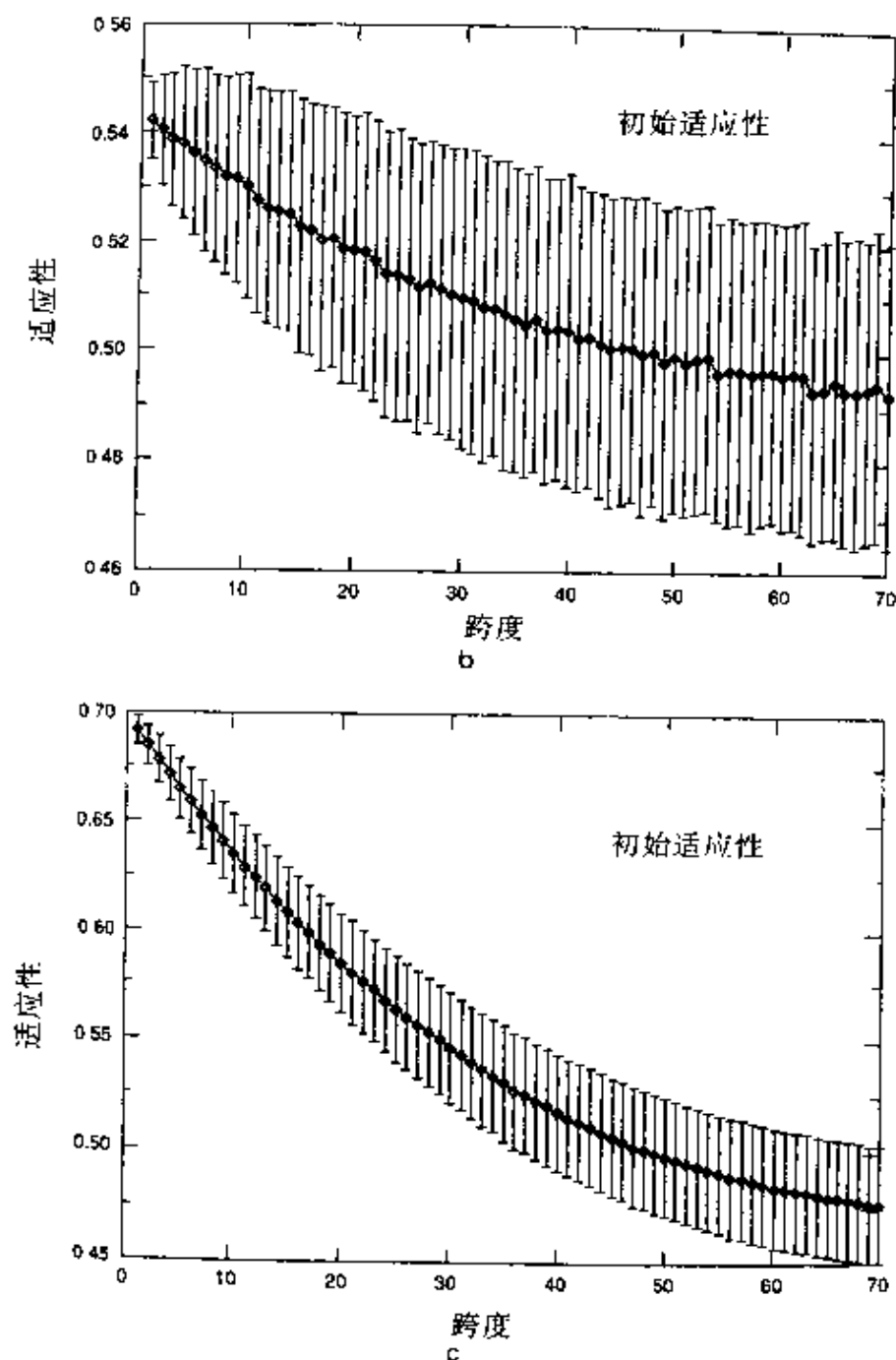


图 9.2 随着适应性的增强,搜寻范围越来越近。在相关的地形上,附近的位置适应程度也差不多。远处的适应性则可能远远高于或低于所在地。因此,当适应性较低的时候,最佳搜寻距离较大,并随着适应性的提高而减少。a~c 在这个地形上,以所有可能的搜寻距离派出 1000 个搜寻者,开始时它们的适应性分为三个档次。这 1000 个搜寻者,每一个所发现的适应性的分布规律曲线,都是一个钟形的高斯曲线。每个线段上的交叉点所代表的是对每个搜寻者加上或者减去一个标准差,与它们所发现的最好或最糟的适应程度相对应。



我们希望了解的是：随着某物种适应性的改变，为了达到最大程度的进化，最“优”的距离是多少？是否应该如我前面所述，当适应性水平接近平均值的话，判断其距离会超过相关性长度。如图 9.3 所示，这里总结了图 9.2 的结果，对于上面两个问题，答案都是肯定的。适应性由 x 轴来表示，寻找改进适应性的最佳距离由 y 轴表示。其含义为，当适应性接近平均值的时候，最适应的变体所处的位置就较远。而随着适应性的提高，最适应的变体的位置就越来越近。因此，在适应性进化过程的初期阶段，会出现许多差异极大的变体。之后，所出现的更适应的变体，与原物种的差异就会变小。

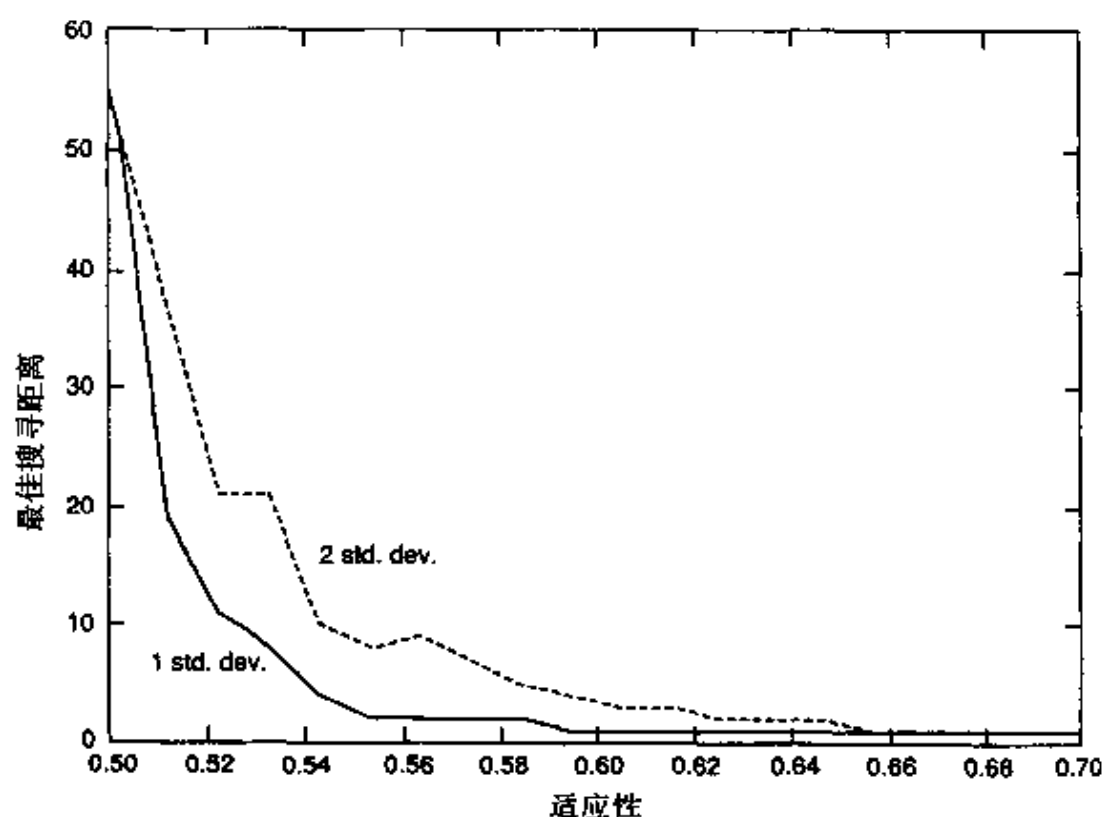


图 9.3 最佳搜寻距离。随着适应性的变化，最佳的搜寻距离是什么？如何能最大地提高改进速率？在本图中，随着适应性的增强，最佳搜寻距离不断缩短，从整个地形的一半，到紧挨着的邻近地区。



这里需要更进一步联系考虑下面一点。如适应性较低，向上攀登的道路有很多。而随着适应性的增强，向上的道路就逐渐减少。也就是说，可以想象，最初，路径像灌木的分支一样错综复杂，在基部向四周扩展很宽，但随着适应性不断增强，道路的辐射分支就越来越少。

将这两个相关的复杂进化地形联系起来考虑，我们发现，起初两者向外辐射的路径也密密丛丛，其中布满差异巨大的变体。慢慢地，它们会删繁就简，随着适应性的增强，变异发生在相似的变体之间。

我相信，生物和技术进化过程正是体现了这些特点。

寒武纪物种大爆炸

从本书的第一章，我就不断提起寒武纪物种大爆炸，以及与之形成鲜明对照的二叠纪物种灭绝。许多生物学家认为，相比较而言，寒武纪是个比较短暂的地质时代。就在这个短短的地质时代中，一大批最基本的物种形式出现了。林氏分类法对生物进行了等级分类。最高等级为界和门，其特征囊括了一大批物种，它们大的形态、特点都类似。比如，脊椎动物门所包括的动物，比如鱼、鸟类和人类，都具有脊椎骨。到目前为止，我们共确立了32个门，这32个门的生物，自寒武纪之后的奥陶纪以来就存在。但是有关寒武纪的研究表明，当时的生物或许可以分成100个门，其中的大多数很快就灭绝了。另外，一项被人们广泛接受的观点认为，在寒武纪，物种的出现是自上而下的，首先出现的物种形成了最高一层的类别。然后，这些门类的物种又分化发展出下一级的物种，它们之间更加相似，但同时又存在足够的差异，我们以“纲”来区分它们。之下又可分出“目”，之下为“科”，再下为“属”，再下为“种”。因此，寒武纪的生物种



类之间差异巨大，属于生物发展的早期形式，后来的物种间的差异则逐渐减少。

但是 2.45 亿年之后，大约是寒武纪之后 3 亿年，我们称这个时期为二叠纪，生物发展进程出现了重大转折，我们称之为生物灭绝，其间有 96% 的物种灭绝了，然而所有的门和更往下的物种生存了下来。在其之后，出现了物种反弹，许多新的“科”和“种”出现了，新的科也建立起来。但是，再没有出现新的“纲”和“门”。更高级的物种是从物种的最底层开始的。如何解释寒武纪出现的物种大爆炸，以及寒武纪和二叠纪之间的巨大差异，一直困扰着人们。

还有一种现象与此相关：在生物灭绝之后出现的反弹时期，似乎大部分的变异和分化都出现在物种分类的早期。古生物学家将这种分支系统称为进化支。进化分支的底端比较密集，各个基础类别出现较早，也就是说，现有的化石记录表明，在生物大灭绝之后的更新期，大多数不同的物种在很短的时间内就出现了，之后发展的速度降了下来。在寒武纪，生物谱系的上层物种首先出现，而在二叠纪，物种谱系的最底层大量涌现，在这两种情况下，都是先出现大规模的变异，之后才是比较保守的试探性进化。

是不是由于复杂的进化地形本身的特点，使得过去 5.5 亿年来的进化过程的特点凸现出来？正如我所说，相关的复杂进化地形，可能存在三个阶段，图 9.3 总结了这一点，而这和寒武纪物种大爆炸的特点正好不谋而合。可以看到，在分支进化的早期，跨越式进化产生的变体，和物种的主干，以及和其他的变体之间，存在极大的差异。这些物种由于相互之间形态差异巨大，因此我们用“门”来区分它们。这些基础物种也产生分化，但它们的分化，跨越的步子就小了一些，所产生的新物种就成了构成“纲”的基本物种。随着进化的深入，不断有更适应的变体被发



现，且这些变体和亲代的距离越来越近，因此也就逐渐出现了目、科、属等级别。

然而，究竟是什么因素导致二叠纪之后的生物繁荣发展的过程与寒武纪物种爆发之间的特点如此不同？我们对于进化地形的了解，是否有助于理解这一现象？也许可能。不过我们尚需一些额外的生物学知识。在生物学者眼中，从受精卵到成体的过程，和建筑大教堂有相似之处。如果基础有问题，后来的麻烦就大了。因此，许多人认为，进化过程早期产生的变异，更容易对生物产生重大影响，这种看法也许是正确的。比如，脊椎若出现变异，就比手指头上出现同类变异要严重得多。我们先假设此观点是正确的。换个方式表述，我们可以说，早期出现的变体，要在更为复杂的进化地形中发展。如果事实果真如此的话，邻近的更适应物种消失得就更快，因为变异对早期进化过程的影响更大。因此，在进化的早期，更难于发现会改变进化过程的变体。因此，如上述说法正确，在后来的进化尚未发生之前，早期的进化就已停止了。然而，早期的变体将在以后门和纲等层次带来大量形态变异。这样，随着进化继续进行，而早期的发展已经陷于停滞，那么二叠纪物种灭绝之后，生物的更新就应该出现大量的新物种，新的进化方向，而变异也会影响到后来的进化。如果上面所说的都成立，就不会出现新的“门”或“纲”。进化方向就会在“科”和“种”的层次上发展，与进化后期变异导致的生物的微小改变相对应。所以生物谱系的每一层都是由下至上发展丰富起来的。

可以设想，到了寒武纪，生物的大多数门和纲，其早期发展都停止了，而当其中的96%都灭绝后，只有更细微的变化，有的可能是由于某种生物的个体变化而引起的变异，才会出现并得到改进。

假如这些观点是正确的，那么生物进化记录的主要特点，包



括寒武纪出现的向各个方向的自上而下的发展，以及二叠纪所出现的不对称发展，都可以简单地归因于适应性地形的结构。同样，我们注意到多种方向的发展可以在早期产生极大的形态变化。由此可以想见，在生物灭绝之后的更新期，在科当中，属的代表物种最先出现，而在纲当中，目的代表物种最早出现。生物进化资料一次次证实存在这种底层较为厚重的分支现象。

复杂地形上的技术进化

乍看起来，生物进化和人类工艺的进化完全不同。然而，帕列夫主教还是建议我们去观察比较钟表匠如何制造钟表，而上帝是如何创造生物；之后，达尔文的随机变异和自然选择理论描述了一个“瞎眼的钟表匠”。生物学者认为，变异就其预定意义来说是随机的。人类不断努力，创造并改进工具，从 200 万年甚至更早期的单面加工的石器工具，到后来的双面加工的旧石器时代的石斧等工具，再到工艺精美的燧石刀具等等。生物界盲目的进化，和人类的技术进步，到底会有什么关系？也许根本就没有任何关系，但也许有很大关系。

抛开目的和智力对人类工艺的影响不谈，我们可以看到，这两个过程经常面临同样的约束，而且这些约束相互冲突。另外，如果达尔文所说的瞎眼的钟表匠，在敲敲打打地创造出每个变异之前根本不知道他的行为意味着什么，我敢说，大多数的技术进步，其实也是源自漫无目的的敲敲打打，起先并不知道会有什么后果。我们思考，而生物进化则无须思考。然而如果面临的问题异常复杂，思考也许帮不上多大忙。其实，我们多多少少都只能算是瞎眼的钟表匠。

技术进步的一些为人熟知的特点，似乎确实能预示在复杂地形下的搜索结果。确实，技术进步的特性，和寒武纪生物大爆炸



有惊人的相似之处：从下层看，生物向多个方向发展，试图创造出不同的形式；越往上，发展的方向越减少，之后出现灭绝，最终只有少数的几个主要变体保存下来，比如最终形成“门”的物种等。另外，早期的变异之间的差别非常巨大，越往后，这些差异就慢慢变成了小修小补。生物类别是自上而下出现的。也就是说，假设出现了根本性的变革——就像枪支、自行车、汽车、飞机等之间的差别那么巨大，那么通常经过许许多多早期的试验，就会产生出大量不同的形态，各自朝着自己的方向继续分化，而最终，当这些变异稳定下来之后，保存下来的，就是一些居统治地位的类别。在第一章，我提到 19 世纪的自行车外观各式各样：有的没有车把，有的前轮大后轮小，有的两个轮子一般大，要不就是有两个以上的轮子；而且，那种当初占主导地位的前轮大后轮小的自行车也发展出许多不同的样式。这些种类繁复的自行车（我们可以认为它们都属于“有轮漫步者”这一“门”）最后演变成了当今占主导地位的双轮或三轮脚踏车，往下可以分为公路型、赛车型和山地型等。我们也可以回想一下 20 世纪初汽车刚开始出现的时候，那些样式繁多的蒸汽或汽油动力的简易车辆。另外，飞机、直升机、摩托车的样式，都有过类似的阶段。当然，对特性的这些印象不能取代细致深入的研究；不过，我的一些搞经济的同事告诉我，根据已掌握的数据，可以看到类似的情况一再发生。每当出现根本性的革新，人们总是试验各种各样的方法，试图改进这个革新。随着新的更好的设计不断出现，想进一步改进就越来越困难，因此后来的变体就越来越中庸。在我们所论及的范围内，这一规律似乎是成立的。这就让我们不能不把它和寒武纪物种大爆炸联系起来，当时物种是自上而下，一下子填满林奈分类表的。技术和生物的进化，似乎都能反映出在复杂的、相关的适应性地形中的发展分化过程。



学习曲线

在复杂的适应性地形中，技术进化的第二个特点与技术发展轨迹的“学习曲线”有关。我们从两个方面来分析。首先，某工厂生产的某种产品的数量越多，效率就越高。大多数经济学家都承认：工厂的产量每翻一番，每个产品的成本（排除物价和劳动力上涨因素）都会按固定的比率下降，一般为 20%。其次，学习曲线的斜率随着技术轨迹的前进而不断上升。一般来说，许多种技术的改进几率，随着整个产业投入的增加而不断减退。也就是说，刚开始技术所引起的生产业绩进步比较明显，后来就渐渐放缓。

我们可以通过这种学习曲线发现其中存在一种叫作幂律模型的特性。最简单的幂律关系可以这样表述：第 N 件产品所需的工时为第 1 件产品所需工时的 $1/N$ 。也就是说，如生产 100 件产品，最后一件所需的工时，是第一件的 $1/100$ 。幂律关系就是单件产品的成本的对数和整批产品成本的对数之比。结果，我们就发现，可以用一条直线，显示出随着全部产品数量的增加而单件产品成本不断降低的规律。

经济学家深知学习曲线的重要性。公司经理们也不例外，在对生产、销售价格、销售数量做决策的时候，他们都要考虑这种幂律关系。实际上，这些学习曲线呈幂律状态分布的特点，对于经济领域技术方面的进步有着根本性的影响：在经济快速增长的初期，新技术领域的投资可以带来产值的迅速增长。这就可以带来经济学者所称的规模收益递增，它可以吸引更多的投资，引发更深入的技术进步。接着，随着学习步骤放缓，每增加一份投资，技术进步的幅度逐步减小，经济学者将这种技术成熟的产业称作收益递减律，此时若想吸引更多的投资进行技术创新就变得



很困难。这样一来，该产业的增长就会放缓，市场出现饱和，进一步的增长，需要其他领域出现根本性的技术创新之后才能产生。

虽然在技术进步和经济发展方面，这些规律无所不在，重要性不容忽视，但没有任何主流的理论承认这种学习曲线的存在。那么，我们观察进化地形中适应性过程所得出的简单结论，是否有助于搞清这一问题呢？这似乎又是一个典型的圣塔菲研究院式的经历。1987年，约翰·里德（John Reed，花旗集团总裁）请菲尔·安德森（曾获诺贝尔物理学奖）和肯·埃罗（Ken Arrow，曾获诺贝尔经济学奖）帮助组织一个会议，广邀经济学、物理学、生物学等领域的知名人士参加。圣塔菲研究院主办了第一届经济学会议，并启动了一个经济学项目，由斯坦福大学的经济学家布赖恩·亚瑟（Brian Arthur）牵头。而我当时正开始致力于将适应性进化地形和技术进步联系起来研究。几年之后，两位年轻的经济学硕士，一位是华盛顿大学的菲尔·奥斯瓦尔德（Phil Auerswald），另一位是康奈尔大学的约瑟·陆卜（Joseph Lobo），当时参加了圣塔菲研究院组织的复杂性理论暑期班，并问我是否可以跟随我做研究，将这些生物进化地形的新观点和经济学结合起来。约瑟当时还开始和康奈尔大学的经济学家卡尔·谢尔（Karl Shell）联系，后者此前已经和圣塔菲研究院交情颇深。到1994年夏天，我们四个人开始在比尔·麦克里迪（Bill Macready）和桑洛·夏帕斯（Thanos Siapas）的协助下进行合作研究。比尔是一位固体物理学家，当时在圣塔菲做博士后研究，和我一起工作。桑洛是麻省理工学院的计算机的研究生，成绩优异。我们研究的初步结果显示，有可能用现在为人所熟悉的NK模型解释学习曲线的多种特点：单件产品和整批产品成本的幂数规律；长期沉寂之后，会突然出现新的进步；进步往往会到达一个平台期，止步不前。



现在我们回忆一下随机进化地形。物种每前进一步，向上继续攀登的可能性就相应减少，减少的量是一个常数，一般是一半。我们还可以看到，在 NK 进化地形模型中，如果 K 的值大于 8，那么适应性每提高一级，周围更适应的同类物种就减少一些，减少的量也是一个常数。与之对照，每前进一步，所需付出的努力，或者说尝试的次数，也按固定的比率增加。这样一来，实现递增改进，或者说发现更适应的变异的几率，会呈指数下降。在 NK 模型中，下降的比率取决于 K 的值。当互斥约束 K 的值增高，进化地形更加复杂，下降速度会加快。最终，复杂进化地形下的适应性进程会到达附近的最高点，然后停滞不前。

找到更适应的变异的比率（对于技术进步，就是制造出更好的产品，或者是降低生产成本）呈指数下降，并且在到达某一最高值时停滞不前，对此我们并不陌生，尤其是把这一点放在技术进步轨迹和学习曲线这两个情况下来讨论。其实这等于是将学习效应的两个广为人知的方面换了个方式重新表述了一下。首先，每找到下一个更为适应的变异所需的尝试，呈指数增加；这样一来，可以想见，可能在很长时间内都不会出现进步，但是一旦突然发现了更适应的变异，就会随之发生飞速的进步。其次，如果适应进程受到限制，仅能在附近寻找，那么，它就会最终停止在附近的一个最高点上，不再发生进步。

但是， NK 模型是否可以证实我们所观察到的幂律关系呢？令我感到振奋的是，事实确乎如此。我们已经知道，找到更适应的变体的比率呈指数降低。但是，每一步究竟会产生多少改进？在 NK 模型中，如用“适应性”值来代替“能量”或“单位成本”，而适应性进程的目的在于寻求能量或成本的最小化，那么，每经历一次进步，单位成本的降低，和上一次进步所带来的单位成本的降低呈现出一种固定的比率关系。也就是说，每前进一步，取得新的进步的比率呈指数降低，同时，它所带来的成本降



低额度也呈指数下降。我们四人欣喜地发现，幂律规律对所需尝试的次数或者总产量产生影响，从而单位成本呈下降趋势。因此，如果把单位成本的对数作为 y 轴，所需尝试的次数或者总产量的对数作为 x 轴，我们就能得到所预计的呈直线（或接近直线）的分布规律。

不仅如此，另外我们还惊奇地发现（就我们目前所处的研究阶段而言，可以称之为有益的怀疑论），不仅从 NK 模型中可以发现幂律关系，而且我们还发现了，幂律关系的曲线，正好和实际的学习曲线相吻合。

请大家不要把这些结果当作证据，表明 NK 模型本身就是技术进步的精确的微观描述。 NK 模型只不过是一个虚拟的世界，用以验证我们的直觉。不过，这第一个进化地形模型带来的成功，毕竟说明，更好地了解技术进步的地形，有助于我们更好地理解技术进步本身。

对于技术进步，我不是这方面的专家。事实上，对于寒武纪生物大爆炸我也所知不多。但是两者之间存在令人惊异的相似之处，而且，我认为有必要认真思考生物进化和技术进步的分支规律之间是否真的存在关系，是否受某种相似的普遍规律的影响。这不应该使人感到惊奇，因为这种适应性进化的所有形式，都是在复杂性有高有低的“适应性”或者“成本”地形下进行探索。如果这些地形的结构在很大程度上具有相似性，那么，这下面发展分化的适应性进程也就应该具有相似之处。

没准儿生物和陶器的产生发展过程真的是很相似。普遍的规律有可能控制着所有复杂系统的进化，不论这种系统源自自然，还是源自人类。



第十章 台上一点钟

达尔文自己设想的生态系统，是杂乱的，充满了各种生命形式，诸如山楂、常春藤、蚯蚓、鸟雀、蛾子、虫子、不知名的甲虫以及松鼠、狐狸、蕨类植物、丁香、接骨木，还有松软的苔藓，数不胜数。一个世纪之后，迪伦·托马斯(Dylan Thomas)在歌中这样歌唱他的故乡威尔士：

在上帝加速的最后的夏日
在橙红色的日潮中
这一天正被风卷落，
在被大海摇撼的屋子里
在萦绕着鸟鸣和果实、
泡沫、长笛、鱼鳍
和浮标的危岩上
在树木舞蹈着的双脚上，
.....

芸芸万物此消彼涨，依着不同的旋律和节奏，舞动生命。而这一切的生命律动，因着指挥的缺席，而变得更加奇妙壮观。每一种生物，都是靠着另外的生物创造的精妙的小生境而生存。每



一种生物，在盲目地找寻自己的生活的時候，也创造了其他生物的生活方式。生物圈就像一个沙洲，许多角色在上面交织上演——新陈代谢、生物变态、行为动作，而这一切，又完全自给自足，令人惊叹。阳光被收集利用；二氧化碳和水被合成为糖；氮被固化变成氨基酸。所有这些收集起的能量，被用来促进细胞内、生物体内以及生物体之间的新陈代谢。

40 亿年前，一些分子聚合体互相影响，完全盲目地彼此刺激，产生新的分子聚合体，后来，分子聚合体的种类变得足够多，最终出现了自给自足，能不断持续下去的链式反应，于是生命诞生了。这些盲目的相互作用，引发了单细胞生命的出现；而这些细胞之间，也有新陈代谢的交换在盲目地进行，由此形成了最初的生物圈。几十亿年以来，这些小生物圈目睹了无数生命物种的出现和消亡。我们能感到，其中的每一阶段，在蓬勃的生命背后，都是因着某种自然律的存在，而造成了这些必然。

大卫·劳普（David Raup）是芝加哥大学著名的古生物学家，他推测地球生物史中曾出现的物种当中的 99% 到 99.9%，如今都已经灭绝了。现今，地球上大约有 1000 万到 1 亿个物种。按照他的说法，生命的历史已经目睹了 100 亿到 1000 亿种生命的生死轮回。1000 亿种生命，曾在地球舞台上出现，而后又销声匿迹了。

而我们，对地球这种开放的热力学系统，究竟是如何产生秩序的，所知甚少。但是我们许多人都能感知到生命的繁荣背后的必然性。面对这些复杂的系统，尽管我们无知，却可以依据一些线索做出判断，认为这种必然性存在于三个层次。第一个层次是生物群落，或者小的生物圈，在里面不同的物种依靠彼此创造的小生境共同生存。第二个层次，历时要长于生物群落组织和生态发展，我们称之为共同进化。物种不仅仅是在自身的进化地形中发展前进，如我们在第八、第九章所述，而且还相互影响，共同



进化。我们所讨论的适应性进化地形，是一个理想化的、静止不变的地形，它并不存在。适应性进化地形，随着整个地形的变化而变化。某种生物的适应性地形的变化，有可能是由于为它提供小生境的其他物种在自身的适应性地形中发生了变异。蝙蝠和青蛙，捕猎者和被猎者，都在共同进化。蝙蝠每进化一点，青蛙的进化地形就随之而改变。物种是在平行互动的进化地形中进化。

此外还存在第三个更高的层次，其时间跨度，很可能比共同进化过程还要长。物种的共同进化，不仅改变自身，也改变它们之间相互作用的方式。经过一段时间，适应性地形的复杂性会发生变化，其弹性也会改变。这里弹性是指某个地形受其主宰物种的影响的程度。也就是说，共同进化过程本身也在进化！

在所有这些节奏中，没有能主宰一切的指挥。自然选择仅仅作用于生物个体这个层面。自然选择挑选出单个更适应的变异，这些变异最有可能留下子嗣。生物学家认为，几乎可以肯定地说，自然选择不会作用于生物的群体，它不会从多个群体中选择某个更为适应的群体。自然选择也不作用于整个物种，或者整个生态系统。这里，我们面临的最大困惑就是生物群落所显示出的自发秩序，它表现在群落组织、共同进化以及共同进化过程本身的进化中，这些似乎都确定无疑地表明，自然选择只作用于生物个体。亚当·斯密在他的《国富论》中首先向我们描述了这只无形的手。经济运行当中，每个因素都是为了一己的私利而运作，其结果是，在不知不觉间，它们的行为也会为群体带来益处。如果自然选择仅仅能作用于生物个体，自发地选择更为适应的变异就是一种自私的行为，因为这样做可以留下更多的后裔，那么，生物群落、生态系统和共同进化的系统以及共同进化过程的进化所显示出的自发性秩序，就是由某个无形的指挥控制的。我们力图寻找构成这个无形指挥的规律，而且我们能够找到这些规律的蛛丝马迹，因为共同进化过程的进化可能使共同进化的物种处于



有序和混沌之间，我将这个中间阶段称作混沌边缘。

群 落

研究群落运动变化和群落组织的生态学家有一大批广为接受的理论可供参考。前者通过研究捕猎者和被猎者，或者其他的相互作用网络，来研究生态系统的群落变化。20 世纪早期，A·J·洛特卡（A. J. Lotka）和 V·J·福特拉（V. J. Volterra）两位理论生物学家建立了该学科的理论基础，至今，它还被大家所接受，并且衍生出一些简单的模型，这些模型讨论的是群落内物种的相互作用和消长规律的。

假设有这么一个生态系统，由草、兔子和狐狸组成，其中既有植物，也有食草动物和食肉动物，每样一种。在这一最简单的模型中，做一最简单的假设：在每平方千米土地上，草的生长量是一定的。兔子吃草，并交配繁殖。狐狸猎食兔子，并交配繁殖。把兔子群落的消长比率作为目前兔子和狐狸群落数量的函数，用公式表示出来，并且把狐狸的消长比率作为目前兔子和狐狸数量的函数，同样用公式表示出来。每个公式都是一个微分方程，表示把某物的变化率（比如某群落中个体的数量）当做另外一种东西（比如当前兔子和狐狸的数量）的函数。欲解此方程，我们需要假设在开始时，单位面积内有一定数量的狐狸和兔子，按照此方程，我们应该能够预测出经过一段时间之后，兔子和狐狸的数量会如何消长。

在这类模型中，物种群落往往不是在某种状态下稳定下来，就是动荡不休。图 10.1 就说明了这两种倾向。把狐狸和兔子的数量放在 y 轴上，时间为 x 轴。随着时间的推移，在第一种情况下，开始时，兔子和狐狸的数量会有所变化，或消或长，但最终会稳定在某个状态，不再变动。在第二种情况下，兔子和狐狸的

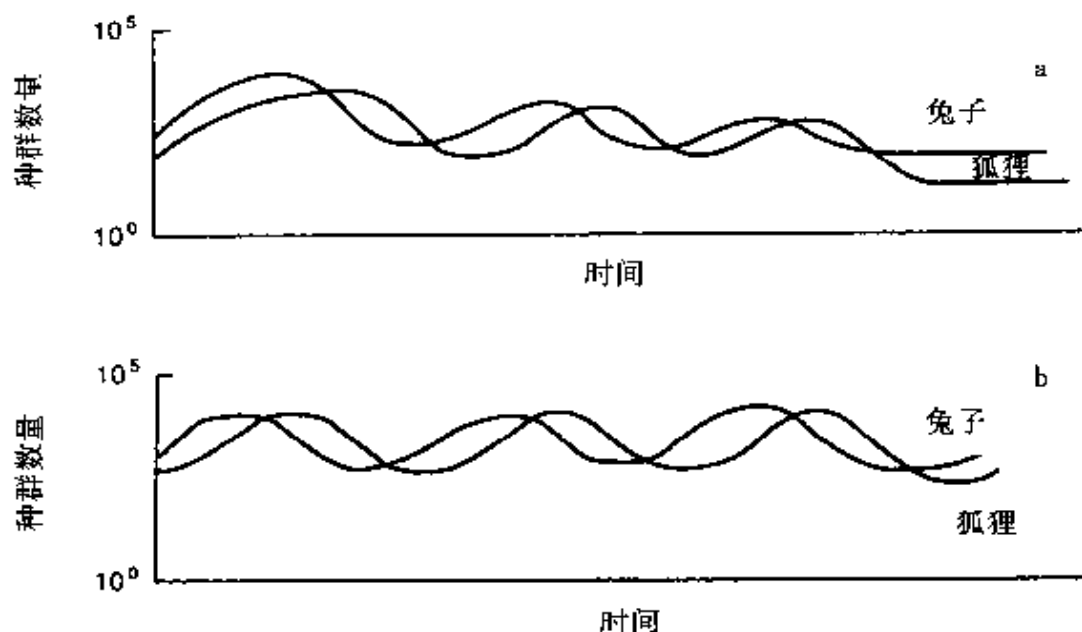


图 10.1 由狐狸和兔子组成的假想生态系统。该图表显示的是随时间变化，种群的变化情形。a. 系统进入稳定状态，每个物种的种群保持恒定。b. 狐狸和兔子的种群波动不定，我们称之为极限环。

数量会增长或减少，一直动荡不定，我们称之为极限环。开始，狐狸的数量很少，捕食兔子的速度抵不上兔子繁殖的速度。这样一来，一开始，兔子的数量会增加。不久，由于兔子数量增加，狐狸衣食不愁，狐狸的数量也会增加。但是随着狐狸的增多，被吃掉的兔子越来越多，超过了兔子繁殖的速度，兔子数量因此减少。兔子一少，狐狸的食物就会不足，就有一部分被饿死。当此际，兔子免除了狐狸的威胁，数量会再次增加。这样，该极限环就会不断循环往复，永无终结。

在实际的生态系统中，这种动荡不定的情况并不少见。福特拉在他的洛特卡-福特拉方程中，对北冰洋的捕鱼业的波动进行了研究。我们也可以查到关于北极狐和兔子种群的多次循环波动记录。更加复杂的状况，如混沌状态，甚至会出现实际的生态系统中。实际上，混沌理论的早期工作多是数学生态学者做出的。在这些系统中，原始状态的极微小的变化，例如兔子和狐狸



的数量，会对该系统后来的进化产生极大的影响。

研究像洛特卡-福特拉模型，生态学者可以找到支配着捕猎者-被捕猎者关系的规则。类似的模型被用来研究种群变化，所涉及的物种，可能与更复杂的种群相联系，这些种群包含多达十数个，甚至成百上千个物种。但是种群比食物网络更为复杂，因为两个种群，可能是共生关系，也可能是竞争关系，还可能是宿主和寄生的关系，甚至有多重关系。一般而言，物种多样，有可能揭示出群落行为、复杂的波动或者混沌行为等的简单的固定模式。

可以想见，某些物种的数量可能不断减少，直至消失。同时，其他的物种可能进入该群落，改变相互作用的体系和种群变化关系。进入某个群落的物种，可能导致该群落内其他物种的消亡。某个物种的消亡，既可能使得某些物种的数量增加，也可能导致其他物种的消亡。

这些事实使我们得出更进一层的关于群落组织的生态理论。这里，一个最基本的问题是，稳定的物种群落是如何结合在一起的？答案是未知的。对于相关的多个方面，已有实验研究。例如，假设某人有一块草原，或者是一块沙漠，他在这块地的周围建起篱笆，这样，某些小动物就无法进入这块土地。该土地上的植物，会随时间而改变。有人可能认为，把篱笆拆掉，让这些小动物重新能进入这块地，就可以将这块地上的植物群落变回到原来的样子。然而这种直觉似乎是错误的。一般说来，我们得到的，将是一种不同的稳定群落。我们似乎可以这么认为，假设有一批后备的物种，它们有可能进入某块土地，那么，这块土地上最后形成的群落，在很大程度上取决于物种进入的顺序。我的一个朋友，斯图亚特·皮姆（Stuart Pimm），是位生态学家，造出“矮胖效应”（Humpty Dumpty Effect）这个术语：通过添加或删除最后的物种，你不可能将某个群落变回到原来的状态。皮姆给



了一个很好的例子：北美洲的草原和动物群落在多个间冰期是如何发生改变的。在过去的1万年间，间冰期内生存的生物有人类、野牛、羚羊等。而在此前更早的间冰期，则生活有马、骆驼、地懒等等大型哺乳动物。另外，不同的间冰期，植物群落也发生了改变。每次间冰期，这里的生物群落中总有不同的物种生息繁衍。

皮姆和他的同事一直致力于寻求能解释这些现象的原因，他们所获得的结论，和我们在第八、第九两章所探讨的适应性地形模型有极大的相似之处。不同的群落，可以看作是群落地形（community landscape）中的不同的点。如最初的物种有变化，那么这个群落最终到达的高峰，或者说最后稳定的群落，就会不同。他们借助洛特卡-福特拉模型来建立群落组织的模型。皮姆和他的同事设想了一组备选的物种，某些物种，比如草，自己生长；另外一些，比如兔子等，靠吃草生存；更有一些，如狐狸等，靠吃兔子生存。

在这些模型中，皮姆和他的伙伴随机选取一些物种，将其置入某一地形中，观察其中生物种群的发展规律。如果有的种群消失，就等于是从这个地形中去除了。他们的研究结果令人振奋，但同时，也尚存许多人们无法理解的疑点。比如，他们发现，最初，向里面引入物种比较容易，但是随着物种的增多，后来就很难将新的物种添加进去。也就是说，随机选取的物种，必须能够适应这个小地形中的生物群落，才能生存下去。最终，这个群落模型就变得饱和而稳定，无法加入新的物种。但是如果反复进行这一仿真试验，事先选择的物种相同，当最后到达稳定状态后，所获得的群落可能非常不同，而且这主要取决于物种进入的顺序。有人还会进一步问，当这个小地形中的生物群落进入稳定状态之后，如果把某个物种从中去除，结果如何呢？我们发现，该生物群落可能像雪崩一样迅速消亡。这主要是由于连锁反应的作用。



用。比如，某种草的消亡，会导致以这种草为食的某种食草动物的消亡；接着，靠这种食草动物为生的某种食肉动物，也会消亡。倒过来说，如果首先去除某种食肉动物，可能使得两种食草动物免除被猎杀的危险，不过，其中一种可能比另一种更善于获取生存所需的草，另一种因此而有可能逐渐灭绝。在这些研究当中，人们发现会产生许多小规模物种消亡，同时也会有大规模的消亡发生。

皮姆和他的同事的发现非常重要，同时具有普遍意义。他们似乎发现了物种消亡过程中的某种分布规律，这种规律也可被描述为一种幂律关系。假设我们定量分析某次消亡事件，用 x 轴来表示消亡物种的数量，用 y 轴表示某特定规模的消亡事件的次数（图 10.2a）。一般会产生多次小规模的，和几次大规模的消亡

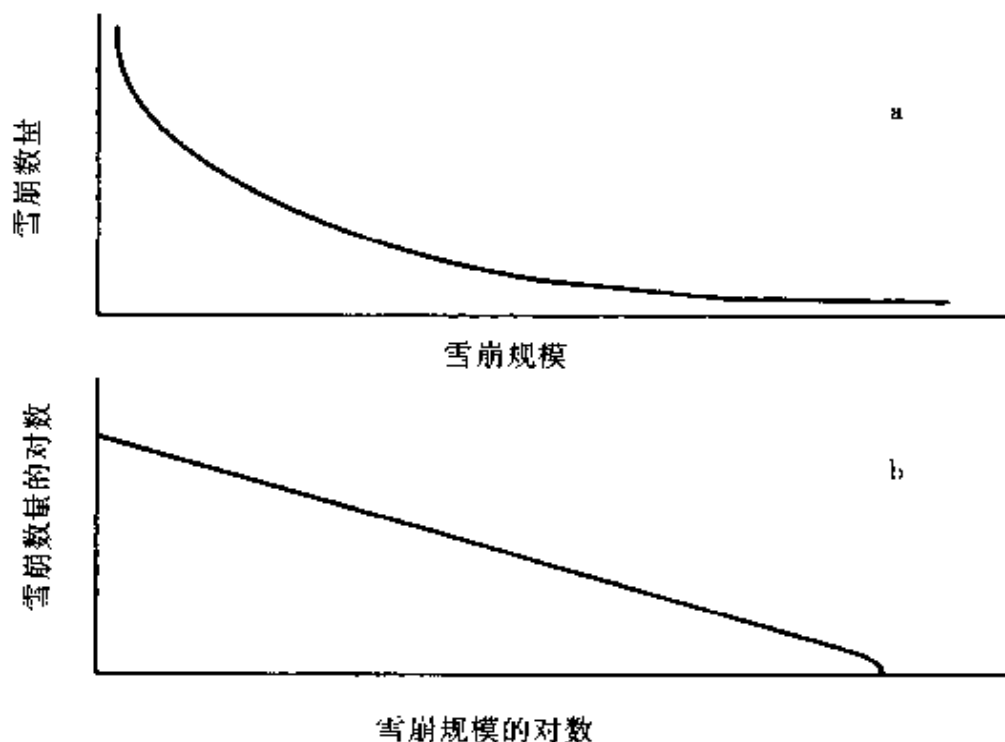


图 10.2 灭绝雪崩：灭绝雪崩的假想分布图。a. 灭绝事件的规模（即发生灭绝物种的数量）与每个不同规模的灭绝雪崩的对比，表明小型灭绝雪崩多，大型灭绝雪崩少；b. 使用对数图表示同样的假想数据，其结果显示其分布特点符合幂律分布的线性关系。



事件。在真正的幂律关系中，随着表示消亡事件的幂达到一定级别，某特定规模的消亡事件的次数应该减少。有个简单的办法可以验证这一点。把消亡的规模的对数置于 x 轴，而把某特定规模的消亡事件的次数的对数置于 y 轴。如果我们使用对数标尺来表示其中的幂律关系，制作出对数图表，所得到的就是一条直线。经过严格检验，证明确实存在这种关系（图 10.2b）。

这种分布规律有两个特点最令人关注。首先，由于它符合幂律关系，这就意味着各种规模的物种消亡都可能发生。小型的物种消亡比较普遍，不过只要观察的时间足够长，就有可能碰上任何规模的物种消亡事件。另一个特点，是开始时同样的小规模物种消亡，比如其中一个物种消失了，既有可能引发小规模的变化，也可能引发灾难性的大变化。

在不同的层次上我们不断发现有证据可以证明这种按幂律关系分布的规律。在第四和第五章，我们考察了布尔代数的遗传网络中的混沌边缘状态。我们曾谈到，单个开关基因行为的改变可以引发一系列的变化。在秩序和混沌的过渡区域，这些系列改变或者彻底改变的规模分布的确符合幂律关系，许多小规模的变化和少数的大规模改变传出的信息，迅速遍及整个系统。事实上，许多过渡阶段都体现出这种幂律关系分布。第六章在讨论生态系统代谢关系多样性的时候，我们曾得出结论，认为生态系统可能进化到近临界 - 超临界边缘。在此边缘，能导致新分子产生的连锁反应的可能性，正好是 1.0。从中也应该能得出新分子产生的幂律分布规律。本章的后面，在其他的共同进化模型中，我们还将发现物种的消亡也存在幂律分布现象。这些模型都远非平衡系统，每种模型都呈现出相似的自发的规则。也许里面存有尚未阐明的规则。

除了物种灭绝事件分布方面的原因，还有其他方面的原因，令人们关注对于群落组织的仿真研究。我们尤其无法明白，为何



群落模型会“饱和”，越到后来越难，直至不可能加入新的物种。如果绘制这么一幅“群落地形图”，上面不同的地点代表不同的物种组合，那么其中的最高峰，代表的就是适应性的最高程度——一种稳定的组合。物种通过基因的突变来探索适应性地形，生物群落则通过增减物种来探索对应的群落地形。皮姆认为，随着生物群落不断向适应性高峰攀登，上升变得越来越困难。越往前进，向上的道路越少，增加新的物种也就越困难。到达一定高度之后，就不可能再加入新的物种。这样就达到了饱和状态。另外从同一起点出发，生物群落可能登上不同的高峰，每一个都代表一种不同的稳定的群落。

皮姆还认为，使用地形的概念来描述这种情况存在一些隐忧。他遇到的问题是，他所预测的可能存在的群落空间，可能都是由他假定的备选物种构成的。群落组合就有可能是某个群落通过增减某些物种，变成相邻的群落。这样，如果存在所谓的“群落适应性”，我们就会自然而然地想到已经熟悉的概念，即“适应性地形”。而问题在于，讨论“群落适应性”，似乎不合情理。比如，不论我是格兰马草，还是小松鼠，如果进入一个新的地方，就必须弄清楚什么对自己有利，以适应新的环境和里面的物种。我进入这个地区能否成功，在于我的到来是否能创造出“更加适应的群落”。

不过皮姆的仿真试验的确表明，似乎确实存在“群落适应性”，似乎生物群落确实也是在向适应性的高峰攀登。

所以如果现实中不存在，至少是在这个模型中，我们可以看到一个自发的现象。决定物种间相互关系的因素，比如谁是捕猎者谁是被猎者，谁是寄生者谁是宿主，似乎都是随机的分配。因此，不需要斯图亚特·皮姆和他的同事的指导，不需要了解为什么这一切会发生，生物群落模型的行为，看上去似乎都是在攀登附近的最高峰，即发展成为稳定群落。似乎是有一只无形的手操



纵着这一切。

共同进化

到此为止，我们所研究的最简单的模型中物种本身是固定的，它们不再进化。如果想通过所建立的模型，了解真正的生态系统的运行，我们还需要把物种进化的因素加进去，也就是要考虑共同进化的问题。

物种总是生活在其他物种所创造的小生境中。这种情况一贯如此，似乎也将永远如此。一旦出现了最初的生命，并开始分化，互相交换分子，这些分子或为营养，或为毒素，物种从此就开始了共同进化的生命之舞，它们之间或互依共生，或相互竞争，或一方为捕猎者，一方为被猎者，或一方为寄生物，一方为宿主，相互倾轧，各为己利。

花朵与为它授粉并依靠花蜜为食的昆虫共同进化。几百万年以来，这种互利共生的关系就一直存在着。初秋时节，蜜蜂寻找花蜜，用它们独特的舞蹈，向同伴告知何处有丰富的蜜源。某些植物的根瘤渗出碳水化合物，滋养着一种特殊的细菌，它们将空气中的氮固化，反过来供给植物生长所需。人类释放出二氧化碳供给植物，植物则释放氧气供给人类。世间万物无不相互交换。生命是一场巨大的垄断游戏，最终的通货是能量，而阳光则是我们的银行，或者是最后的储备。

这种互利共生、共同进化现象非常普遍，超过我们过去所想，而且可能非常密切。比如，我们发现，构成多细胞生物的复杂真核细胞通过构成内共生同盟（endosymbiotic alliance）来进化，在内共生同盟里，本来的自由细胞构成了线粒体和叶绿体。在线粒体中，人们还发现存有一种独立的基因系统，一般认为，这是线粒体的祖先，那些本来的自由细胞的遗留物，至少部分如



此。可以想见，将两个细胞的新陈代谢联系起来，一为宿主，一为内共生体（endosymbiont），借此两个细胞可以互相获益，该是多么复杂的过程。这样，线粒体按照一定的速度分裂，在每个细胞中的数量处于稳定状态，而细胞则可享受此番努力所带来的能量。细菌也有一种特殊的内共生体，一种 DNA 螺旋，称作质体（plasmids），它只在细菌的宿主细胞内分裂，并携带有分子信息，例如对某种抗生素的抵抗力。

不仅仅是共生现象牵涉到共同进化。宿主和寄生物之间形成的系统也共同进化，从疟疾病原体到艾滋病原体 HIV 病毒。疟疾病原体能够改变表面的抗原，从而躲过宿主身上免疫系统的侦察；宿主的免疫系统也不断进化，努力适应并捕捉、消灭疟疾病毒。这场分子之间的捉迷藏一直在进行。受到 HIV 病毒感染的人体内也进行着一场类似的共同进化的舞蹈，只是更具戏剧性，也常常更加致命。在 HIV 阳性的人身上，艾滋病毒快速进行着变异。这一点，我们是通过某个患者身上的 HIV 病毒进行了详细的 DNA 排序之后得知的。就像寒武纪生物大爆发，或者物种灭绝之后的更新期一样，这种病毒飞速分化出许多序列。有一种理论解释说，这种分化现象，是由于病毒的进化机制在试图躲避免疫系统对它的反应。免疫系统力图找到对付病毒的办法，因此抗体也在进化。这是另一场捉迷藏游戏。人体的免疫系统和 HIV 病毒在共同进化。很不幸，到目前为止，HIV 病毒一直占据绝对上风，这是因为它所攻击的细胞，不是喉部的黏膜细胞这一类，造成的也不仅仅是喉炎而已。它所攻击的，是免疫系统本身的辅助 T 细胞（helper T-cells）。目前，在找寻艾滋病的治疗方法的研究当中，一部分就是想试图阻挡 HIV 病毒进攻并进入辅助 T 细胞。不幸的是，HIV 病毒的进化速度似乎太快，宿主细胞难以捕捉到它。

在捕猎者和被猎动物之间也会产生共同进化。比如，某些贝



类的壳上形成了钙化的尖刺，这有可能是因为如果贝壳不够复杂坚硬，就会被海星剥开。与之对应，海星的嘴变得更尖、更大，吸力也加强了。这种类型的持续不断的共同进化被称作是“军备竞赛”，或者叫“红后效应”。后一个说法是芝加哥大学的古生物学者李·范·凡伦（Lee Van Valen）最先使用的，其典故是在《艾丽丝漫游奇境记》中，有位红皇后（一般叫她红后）曾向艾丽丝说：“你必须不停地跑，才能停留在原地。”在共同进化这场军备竞赛中，当红后处于主导地位时，所有的物种也要不停地改变，无限地改变其基因型，只为了在这场军备竞赛中保持自己的适应性水平。

在生物进化中，共同进化这一面似乎效应巨大。力图证明任何一对对立物种，或者是同一物种中的对立生物都存在共同进化的关系并非毫无意义，更何况，有些进化生物学家还怀疑，共同进化过程到底如何普遍，并具有多大的意义。当然，大多数生物学家都认为，生物之间的相互遗传作用，是生物进化的主要特点之一。

广义的共同进化也存在于我们的经济和文化领域。在某个经济体系中，存在某种商品或者服务，是因为它们对于制造另外的商品或提供其他的服务是必需的中介物，或者对某些最终消费者有用。商品或服务依靠其他商品或服务所创造的小生境而存在。经济领域的活动可以作为生物圈内互利共生现象的一面镜子，在经济领域，由多种商品和服务构成了巨大的系统，逐利行为带来了贸易。稍后我将对两者进行对比分析。物种的相互作用、共同进化的全景图正展现在我们眼前，每一种生物的出现和生存都依靠其他物种营造出的小生境，每一种生物也都有其消亡的时候。与之相比较，在技术进步的作用下，技术、商品、服务不断产生，也不断消亡。很明显，这两者之间多少存有相似之处。我们各自都驱赶着自己的工具——细菌、狐狸、首席执行官等。另



外，我们也都在为其他生物生存所需的小生境创造着小生境。我怀疑，这中间不仅仅是存在相似之处而已。我怀疑生物的共同进化和技术的共同进化，生物圈和我们的“技术圈”多样性的不断提高，可能都受最基本的规则控制。

生物学家是如何看待共同进化的呢？目前有一个主流理论，我本人认为这个理论相当有道理，它建立在博弈论的基础上。博弈论由著名的数学家约翰·冯·诺伊曼(John von Neumann)创立，并由他和经济学家奥斯卡·摩根斯坦(Oskar Morgenstern)共同发展起来，该理论力图探讨理性的经济因素(rational economic agents)。在我们进入博弈论领域之前，有必要强调说明一条关键的区别。虽然在经济运行中，你我有可能依据对未来的预见，对自己的行为和可能产生的后果做出计划，但是在进化博弈论中，所有各方面必须符合我们的一条最基本的假设，那就是变异是随机产生的，目的是对生物的适应性产生影响。我可能会对自己的私利做出理性的判断；但是某个正在进化的细菌种群却不能。物竞天择，适者生存，但是产生某种变异的细菌，并不是特别地要去按照某种方式进化，为自己牟取私利。

著名的“囚犯两难困境(Prisoner's Dilemma)”可以很好地说明博弈行为最简单的情况。话说AB两人被警察逮住了，被分别关押。警察告诉A说，如果揭发B，同时B没揭发A，那A就自由了。他也将同样的话告诉B。B要是站出来揭发，而A保持沉默，B就可以逃脱。在任一情况下，不论是谁保持了沉默，那个老实的家伙都将被监禁20年。而如果A和B都揭发对方，那他们各自都会受到严惩，但是和一个揭发、一个沉默的情况相比，刑期却要短。比如，两人可能各自被判入狱12年。如果两人都保持沉默，就会同时被轻判，时间是4年。

大家可以看出这里面的两难困境。如果我们把沉默称作“合作”，而把揭发叫做“背叛”。通常的选择是两人都背叛对方，



站出来揭发。A琢磨着如果他说出来，他的下场就会比较好，因为如果B不说，他就自由了。而即使B说出来，他面临的结局，也比自己保持沉默而由B说出来的结局要好。B则和A想的一样。这样两人就会都背叛对方，面临入狱12年的结局。

博弈论的根本性问题是：每一组博弈者都面临多个结局，同时也都有不同的策略可供选择。选择某个策略所能带来的结局，取决于其他参加者选择了什么样的策略。如果每个博弈者都是为了自己的私利而竞争，会产生什么样的协作行为？博弈论就是力图精确分析对独立的各方产生影响，使之协同动作的那只无形的手。

博弈论的先驱之一，约翰·纳什(John Nash)创立了一个著名的法则，该法则表明，对于每个博弈者，至少总有一个所谓的“纳什平衡策略”，如每个参加者都选择这一策略，任一参加者面临的结局就比选择任何其他策略要好。这些博弈者所拥有的一系列策略选择就称作纳什平衡。在“囚犯两难困境”例子中，相互背叛的策略就是纳什平衡的一个例子：如果对方有可能背叛，那如果我不背叛，不论做何选择，结局都会更糟。站在对方的角度，情况也是一样的。因此，相互背叛就是一种纳什平衡。纳什平衡这一概念非常有创见，因为它可以帮助我们解释独立、自私的个体，在没有指挥的情况下如何协作。

纳什平衡令人着迷，然而利用这一概念找寻问题的解决办法，存在重大的缺陷。对于每个个体来说，纳什平衡可能无法带来最优的结局。另外，在大规模的博弈中，参加者众多，每一个都有许多策略可供选择，就有可能存在多个纳什平衡策略。与其他的办法相比，这些策略可能都无法为参加者带来好的结局，另外，无法保证参加者能从多个纳什平衡策略中选择最佳方案，或者，根本就不能保证参加者能从所有的可能性当中找出这些纳什平衡策略。



在“囚犯两难困境”这个例子中，我们可以看到，纳什平衡策略的确不能带来最佳结局。在那个例子中，采取纳什平衡策略，两人都背叛对方而各自入狱 12 年，其结果大不如两人都采取合作策略，即两人都保持沉默，而只各自入狱 4 年这样的结果。不幸的是，结局最好的合作策略，由于可能存在背叛而不保险，因为如果对方说出来，而自己不说，那么对方就会被释放。而如果自己决定保持沉默，也就是说选择合作策略，那么自己就面临对方背叛的风险。那样自己要被判入狱 20 年，而对方无罪释放。两人面临同样的风险。

人们针对“囚犯两难困境”做了许多研究，试图找到在何种情况下会产生合作行为的规律。大概的情况是这样的：如果 A 和 B 反复参与同一博弈，而且不知道要重复多少遍，那么就有可能出现合作的情况。对于单一的博弈，理智的策略是相互背叛，但是令我们感到惊奇的是，如果反复进行同一博弈，会出现完全不同的策略选择。密歇根大学的政治学家兼麦克阿瑟学院研究员罗伯特·阿克塞尔罗德（Robert Axelrod），和圣塔菲研究院的同事一起，举办了一场比赛，比赛中参加者反复进行“囚犯两难困境”这样的试验。结果发现，最佳策略中有一种是“针锋相对策略”。每个参加者都采取合作策略，除非另一个背叛。如果出现这种情况，在下一轮当中，第一个参加者会采取背叛策略，也就是“针锋相对”，这样，到后来合作策略会重新被采用。针锋相对策略比较保险，因为它比其他的策略都好，如所有参加者都采用该策略，带来的结局也最好。由于如果重复进行“囚犯两难困境”的博弈试验，可能出现的策略非常之多，比如合作一次背叛两次、总是背叛、总是合作以及其他各种复杂的反应组合，所以我们不知道，在这种情况下，“针锋相对”是否是可能存在的最佳策略。不过令我们感兴趣的是，虽然一直都有背叛对方的诱惑，但是在自私的各方之间，会出现善意的合作。



约翰·梅纳德·史密斯 (John Maynard Smith) 是一位杰出的进化生物学家，也是我的一位老友，他 1971 年来芝加哥大学的时候，我还只是一名年轻教师，刚获得医学博士学位。约翰的主要目标就是研究如何将博弈论应用到进化论当中。他的到访令我欣喜异常，因为它是英国传统的下午茶大师。每天下午，一到喝茶时间，约翰就向我描述他在研究群落模型和种群动态方面的努力。那时，他的电脑仿真模型存在一个根本的缺陷：里面兔子的数量总是不断减少，直至成为负数。试想一下，如果你辛苦建立的模型总是说兔子的数量为负数，那可大为不妙。我当时正好在急诊室工作，给他检查身体做些诊断，发现他得了轻微的肺炎，他那时想必非常沮丧。我帮他治好了病，而约翰则教我如何做布尔代数题。在他的帮助下，我能够证明在第四和第五章描述的布尔体系中的不变成分的主要法则。

约翰试图用公式来描述博弈论，以图应用到生物进化论中。它通过博弈论的纳什平衡推导出进化稳定策略，即 ESS。在第八章中，我们描述了基因型空间的概念：每一种基因序列都可以被看成是可能存在的基因型空间中的一个点。现在让我们把每种基因型都看作是一个策略——每种基因型都包含生物特性和行为方式的编码，这些对于生物为生存而进行的博弈非常重要。我们还可以把同一物种的不同生物体，或者是不同的生物种类，看作是一场博弈中相互竞争的对手。正如在“囚犯两难困境”例子中，某个生物体，通过某种基因型所获得的结局，取决于它所遇到的其他生物体的选择。约翰把适应性看作是这场博弈的收获。生物采取的基因型策略的适应程度，取决于它生命中所遇到并与之竞争的其他生物。所有相互作用的生物及其基因型也面临同样的情况。

有了这一框架，你就可以猜出约翰下一步做什么。生物的几个种群可能有同样的基因型策略，或是每个种群的基因型策略多



于一个。如贝类动物种群可能拥有多种多样花纹不同的贝壳，海星的嘴、吸盘和触须的大小形状也会不同，等等等等。这些基因型策略也会共同进化。每经历一代，这些共同进化的生物种群的一个或多个基因型就会发生变异。这些基因型策略相互竞争，最适应的基因型能够以最快的速度传遍整个种群。也就是说，生物体相互竞争，而每个基因型在生物群落内复制的速度，和该基因型的适应程度成正比。这样，随着种群的增加，适应性更高的基因型也增加，适应性较低的则相对减少。不论是同一物种内相互作用的种群，还是不同物种间相互作用的种群，都是以这种方式共同进化。

约翰由此给出了他所定义的进化稳定策略。对于纳什平衡，只要其他的参与者都采用纳什平衡策略，那么最好的策略就是采取同样的纳什平衡策略。与此类似，在生物进化当中，对于一组物种，如果其他物种各自保持自己的 ESS 基因型，且每一种都有一个出于私利需要保持的基因型，那么就存在进化稳定策略。只要其他物种继续采取进化稳定策略（ESS 策略），那么任何一个物种都不会改变自己的策略。若有物种出现偏差，那么自身的适应性就会降低。

进化稳定策略这个理论确实不错。我很高兴自己有机会帮助约翰治疗他的肺炎，他最终解决了兔子的数量会出现负值这个问题，并发现了进化稳定策略理论。有人说，摩根斯坦对经济学的最主要的贡献是使冯·诺伊曼 (Von Neumann) 对经济学产生了兴趣。我本人能在生物进化领域做出一点成绩，恐怕和当年为约翰开氨比西林治疗他的肺炎不无关系。

这里我们暂时停下来，总结一下我们的思维游戏进行到了何种状态，因为它代表了目前研究共同进化的种群生物学者和生态学者所使用的主要的理论框架。我们设想出了两种行为特点。第一种称作“红后”行为方式，即每种生物不断变化基因型，相互



像是在进行军备竞赛，共同进化的种群永远不会停下来，进入某种基因型稳定状态。另一种情况是共同进化的种群，不论是同种生物，还是异种生物，最终达到基因型稳定状态，不再变化。我们后面很快就会看到，红后行为是一种无序的混沌行为。而可以使所有的物种停止变化的 ESS 行为是一种有序的状态。

在过去的十几年当中，人们致力于研究探索在真实的共同进化生态系统中，到底何时会出现红后行为，何时出现进化稳定策略，以及在这个或干旱或潮湿，有花有草，充满倾轧，纠缠不清的现实世界中，究竟会发生什么。答案尚不可知，而且在这混沌之中，在这个红后的状态中，可能确实存在着一些共同进化过程，同时其他一些生物，则存在于有序的进化稳定策略状态。随着进化的发展，共同进化本身肯定也在进化，其方向可能是向着红后状态，也可能是向着进化稳定策略状态。

我们现在有必要更进一步，探讨控制共同进化的进化规则。也许在无序和有序状态之间，可能存在着转换过程。也许共同进化的进化更倾向于选择靠近混沌边缘状态下的策略。

若想开始探讨共同进化的进化，我们需要一个基本的理论框架。我首先画出这个框架的轮廓，然后在本章的后半部，详细描述这一框架。如我们所看到的，共同进化所讨论的，是适应性进化地形中的一对种群。其中一个种群朝向适应性高峰所迈出的试探性脚步，会改变另一个种群的适应性地形。由于出现了这些改变，适应性高峰的位置也会移动。调整自身适应性的种群有可能成功到达这些高峰，停留在此，从而共同进化也到此为止。这正是梅纳德·史密斯的进化稳定策略所描述的有序状态。另外一种可能性是，由于所有的物种都向上攀登，进化地形变化太快，所有的物种实际上都在混沌状态下不断追逐已经变化的高峰。共同进化过程究竟是发生在有序还是无序状态下，或是两者之间，取决于适应性地形的结构，以及随着种群的经过，该地形变化的速



度有多快。

在第八、第九章讨论过的 NK 适应性地形模型，特别有助于我们理解为何会出现这种情况。设想有两个种群，分别是青蛙和苍蝇。如果有个青蛙特别幸运，由于基因突变，使得它的舌头特别有黏性，而且能使带黏性舌头的等位基因迅速传遍整个青蛙的种群。这样整个青蛙种群就从没有黏性舌头的种群，一跃而成为黏性舌头种群，在它的基因型空间中，一跃而获得了更适应的基因型。而如果苍蝇种群不发生变化，那么青蛙种群，在其适应性地形中，就等于登上了附近的一座高峰，可以开心大叫了。

而可怜的苍蝇种群，面临着新来的带有黏性舌头的青蛙，发现自己的适应性地形发生了变化。在某个地方，曾经是适应性高峰，而现在山峰的高度下降了，甚至出现了山谷。苍蝇必须对由青蛙挑起的棋局变化做出反应，相应长出滑溜的脚甚至滑溜的身体。苍蝇的基因型空间内出现了新的高峰，其中许多高峰的特征，就是长有滑溜的脚。因此，共同进化就是成对物种在适应性地形上的一场竞技。

对手一旦移动，适应性地形就会发生变化，这一事实具有深远影响。在固定不变的适应性地形中，一个种群以比较低的速度发生变异，登上适应性的高峰，并停在那里。一些数学家和物理学家，将固定不变的适应性地形中的流动描述为“势函数”。例如，如果把我们的适应性地形翻个个儿，倒转过来，并把掉了个的“适应性”叫作“能量”，物理学家就会由此联想到物理系统，降低简单或者复杂的电位面的电量。假设电位面固定，附近的谷底，就相当于附近的最小值，或者适应性高峰的峰顶，相当于最大值，自然就是整个系统的终点吸引子（end-point attractors）。在一个复杂的电位面上的球，会停留在附近的谷底。

可一旦青蛙和苍蝇种群开始相互作用，一旦双方由于对方的变化，而导致自己的适应性地形开始变化，结局就难料了。也许



双方都不可能再找到适应的高峰，就此停下脚步，因为适应性高峰本身也在变动，处于进化中的种群可能需要不断追逐这些高峰。数学家将这种共同进化的系统看作是普遍的、复杂的动力系统。

简单地说，此系统只可能出现两种最终的行为。每个种群都穿越自己的巨大基因型空间而进化。如果每个种群碰巧登上了一个适应性高峰，而这个高峰和其他与其共同进化的对手的适应性高峰也是一致的，那么所有的种群都会停止进化。我所说的“一致”和纳什平衡，或者进化稳定策略所指的意思大体相同。到达了自身适应性高峰的物种，只要其他的物种也呆在各自的适应性高峰上，静止不动就是最佳选择。真核细胞和线粒内共生体的共生互补现象，也许可以看作是这种一致性的例子，因为这一对细胞和细胞器官的遗传联合已经稳定地存在了几十亿年。这一组相互一致的、本区域内最佳的不再变化的基因型，正好和博弈论中的纳什平衡相似，就像“囚犯两难困境”中的相互背叛策略。在对方不发生变化的情况下，任何一方都不会变化。

另外一种可能的行为，是所有的物种都变动不止，永无停歇。它们不断找寻已经落在后面的高峰，但是，却由于自身的努力而使相邻物种的适应性地形发生了改变，自身也要间接地承受因此而造成的自身适应性地形的变化。所有的物种，都像西西弗斯一样，永远在向上攀登。这可以称作红后行为。

因此，我们可以看到，在有序 ESS 状态下，所有的物种都到达了本地域内的高峰，停止了变化；而在红后状态里，所有的物种永无停歇，在自身的基因型空间里探寻。通过遗传网络的布尔数学模型，我们也可以看到一个有序的状态，每个停滞的成员都分布在这个网络中；另外，还有一个混沌无序的状态。在遗传网络中，可以发现存在一个连续统（continuum），这是有序和无序之间的一个轴。在有序状态里，靠近混沌和有序之间的转换阶



段，也就是混沌边缘的“复杂状态”。我们能够找到证据，表明这里的计算最为复杂。在有序状态里的转换阶段附近，广布整个网络的，是复杂但不混沌的行为，复杂的事件序列可以产生协作。在共同进化的系统内的混沌和有序之间，是否可以找到类似的连续统？

我认为确实存在这么一个连续统。在有序的 ESS 状态和混沌的红后状态之间，确实存在一种转换阶段，我们曾称之为混沌边缘。似乎共同进化过程本身的进化，倾向于包含这个转换阶段。存在于 ESS 状态深处的某个生态系统过于僵硬，过于固定不变，而无法通过共同进化，离开本地域的高峰。而在红后混沌状态中，情况正相反，在不断变化的适应性地形中，物种不断攀登、跌落，结果是整体的适应性程度比较低。事实证明，当处于混沌和有序轴的中间部位，靠近转换阶段的时候，适应程度最高。生态系统如何达到这个平衡的混沌边缘状态呢？是进化把它们带到了那里。

某个共同进化系统到底是位于有序还是无序状态，取决于每个物种探索的适应性地形的地貌，以及每个物种的适应性地形是否由于对手在自身的适应性地形上的动作而发生变化。如果每个物种的地形都只有少数几个高峰，而这些高峰的位置由于其他物种在自身适应性地形上的动作而被大大改变了，那么该物种就很难找寻到自身地形上发生了位移的高峰。这个系统就位于红后混沌状态。相反，如果每个物种的地形中有许多高峰，而且这些高峰的位置不会由于其他物种在自身适应性地形上的动作而发生大的改变，那么该物种能比较容易地找寻到自身地形上的高峰。这个系统就位于有序的 ESS 状态。因此，很明显，共同进化的系统到底是位于有序还是无序状态，取决于物种的进化地形的地貌特征和它的可变性。而这会带来更高层次的问题。

到底是什么因素决定了适应性地形的地貌特征和其可变性



呢？是否存在“好”的地貌特征和可变性，且由于此，共同进化的一对生物能够共同进化？如果事实如此，我们就应该能够找到控制着共同进化过程的进化规则，这些规则几乎可以保证某生态系统内的生物拥有最佳的生存状态。

耦合适应性地形

在复杂进化地形的 NK 模型中， N 代表一个生物体内特征的数量，或是基因组中的基因数量。每个特征或每个基因，都可能有不同的表现形式或称作等位基因。在比较简单的例子中，每个特征或基因表现为两个等位基因，分别为 1 和 0，其中 1 可能代表蓝色眼睛，0 代表棕色眼睛。如试图用模型来描述基因之间的“上位交互作用”（epistatic interactions），则认为任何基因对生物体适应性的贡献取决于该基因的状态是 1 还是 0，以及其他 K 基因的状态是 1 还是 0。这里 K 表示的是一个生物体内基因中上位成对基因的相互依赖程度。最后，我们用模型来描述某特定基因对整个基因组或生物体的“适应性作用”，对于每个基因和它的 K 上位输入值（ K epistatic inputs）的状态组合，我们随机赋值，取值范围是从 0.0 到 1.0。这样，我们就把整个基因型的适应性定义为每个基因适应性作用的平均值。得出的结果就反映出适应性地形的特征。

现在我们该如何来看待共同进化呢？青蛙长出有黏性的舌头，就对苍蝇造成了影响。我们考虑过苍蝇可能长出不滑溜和滑溜的脚，作为一个应对特征。不过苍蝇可能还有其他特性来对付黏性舌头：使自身味道变得糟糕，能迅速溶解青蛙舌头上的黏液，能够敏锐感知黏液气味以便及时逃跑，等等等等。也就是说，我们会很自然地想到，青蛙的某个特性，可以对苍蝇的 N 个特性造成影响，从而影响苍蝇的适应性。反过来，苍蝇的某个

特性，也可以对青蛙的多个特性造成影响，从而影响青蛙的适应性。飞行快捷的苍蝇使青蛙的适应程度降低。相应地，青蛙可能采取的措施有：舌头变得更长，向外伸展更迅速，舌头上的黏液气味变小，等等。利用 NK 模型，我们不仅可以显示出某个生物体内，基因之间和特性之间如何相互作用，还可以用来显示某个生态系统中，不同生物体的特性之间如何相互作用。

现在我们来建立一个模型，用以表示具有相对应的适应性地形的生物。假设苍蝇的 N 个特性中的每一个，其适应性作用取决于苍蝇的 K 个其他特性以及青蛙的 C 个特性的状态是 1 还是 0。与此类似，青蛙的 N 个特性中的每一个，其适应性作用取决于青蛙的 K 个其他特性以及苍蝇的 C 个特性的状态是 1 还是 0。接下来我们需要将青蛙和苍蝇的特性分别对应起来。最简单的办法，是认为苍蝇的每个特性的适应性作用取决于该特性的状态是 1 还是 0， K 个其他特性的状态是 1 还是 0 以及青蛙的 C 个特性的状态是 1 还是 0。因此，对于这些值的所有组合，我们通过赋值来表示苍蝇的相关特性对于苍蝇整体适应性所起的作用，取值范围是从 0.0 到 1.0。

我们继续用同样的办法处理苍蝇和青蛙的所有 N 个特性，那么苍蝇和青蛙的适应性地形就对应匹配起来了。苍蝇在其地形上向上前进一步，就会改变其 N 个特性 0 和 1 的状态排列，也就改变了青蛙的适应性地形。反过来，青蛙在其适应性地形上的移动，也会改变苍蝇的适应性地形。

到这里，我们还需要向前再迈出两小步。在我们的生态系统模型中，需要多少个物种？每个物种，需要和多少个其他物种匹配对应，并采取何种方式对应？由于是刚开始认真讨论这一问题，我想用一个看上去比较特别的生态系统做例子也就够了。假设此生态系统中有 25 个物种，分布在 5×5 的点阵里，就像一块用方砖铺成的四方地面，在上面，每个物种，都和它四面的 4 个



物种相邻。

接下来，要想通过电脑建立这么一个仿真模型，还需要一点细节。比如可以用这种办法来处理：对于每个物种的整个种群，我们认为它们在遗传上完全相同。这些种群的每一代都会通过将一个随机选择的基因变成它的等位基因，寻求更适合的基因型。如果新的基因型变异更适应，整个种群就会在其适应性地形上移动到这一新的地点。这样这一种群就会做出适应性移动，或者保持不变，或者每一代都向上攀登一步。每一个物种，每经历一代都会有一次前进一步的机会。这样，“代”就可以用来表示经过的时间。下面就是所发生的。

如果每个物种中的上位联系 K 值较高，就有许多可以落脚的高峰；如果物种间的配对关系比较少，也就是 C 的值比较低，那么随着对应物种的移动，物种的适应性地形变化不大；在上述任一种情况下，生态系统倾向于向有序的进化稳定策略状态发展。另外，如果第三方因素，即与每个物种相互发生作用的其他物种的数量比较少（用 S 表示），亦即某个物种的变化所影响到的物种种类比较少，在这种情况下，生态系统也倾向于发展为 ESS 状态（如图 10.3、10.4 所示）。

另外，在混沌的红后状态，物种的共同进化几乎永不停歇（图 10.4c）。当物种的适应性地形上很少有进化高峰时，即 K 的值很低；或当其他物种发生适应性变化，该物种的适应性地形会出现剧烈变化，即 C 的值很高；或者一个物种受到许多其他物种的直接影响，在上述三种情况中的任一种之下，都容易出现混沌状态。在这种情况下，适应性高峰的位置变化很快，物种无法找到它们。

乍一开始，大家对当 K 的值较低的时候容易出现混沌的生态系统可能感到奇怪。在 NK 布尔网络中， K 的值较高会导致混沌。相互的配对关系越多，小的变化就越有可能传遍整个系统，

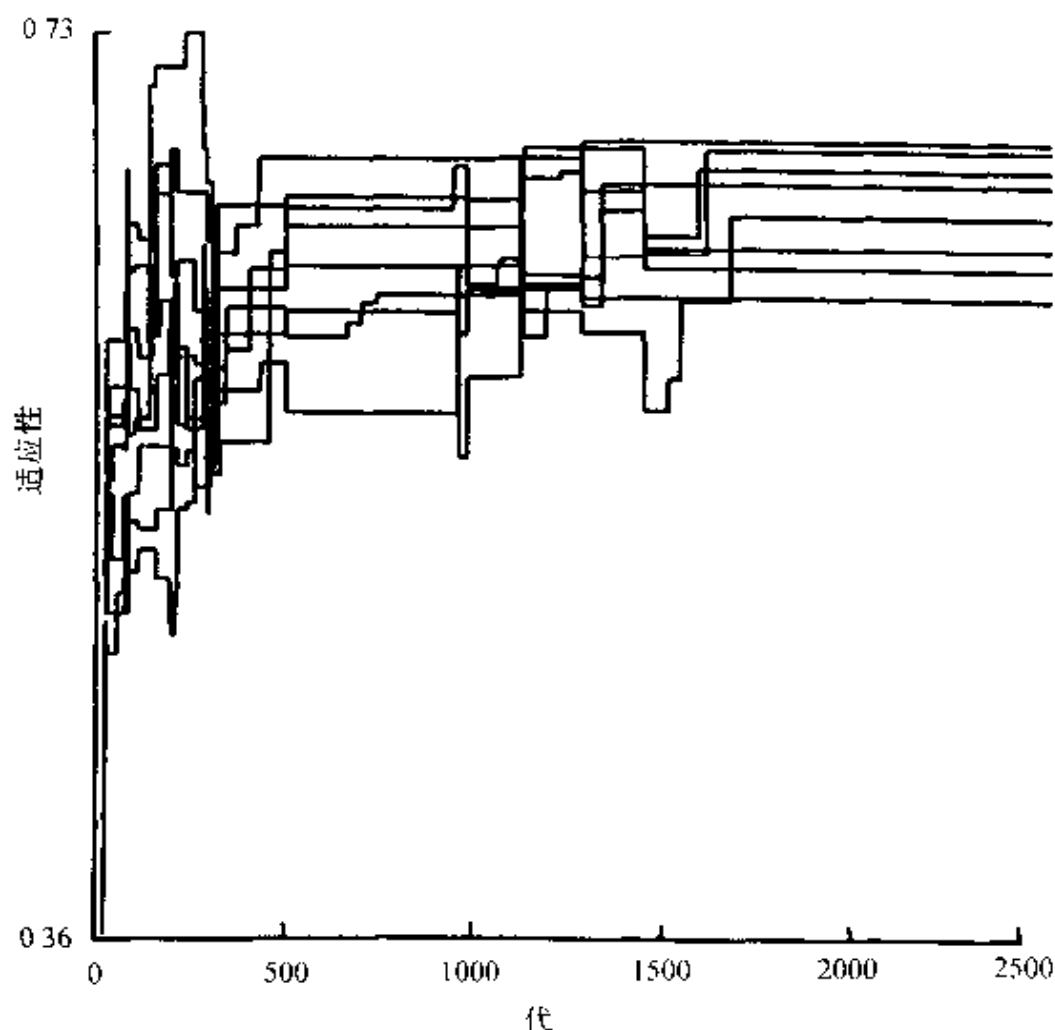


图 10.3 进化稳定策略。8 个物种共同进化，每个物种都受 NK 适应性地形的影响。每个物种的 N 个特性，都受另外 7 个物种的 $C=1$ 个特性的影响。在第 1600 代，物种达到了稳定状态，表明进入了进化稳定状态。

导致它朝向混沌状态发展。但是对于相对应的适应性地形，真正起作用的是物种间的相互作用。当相互联系的值（ C ）较高时，某个物种的变化会大大影响到它的对应物种的适应性地形。如果青蛙的任何一个特性都受苍蝇的许多特性的影响，而且反过来也成立，那么其中一个物种的某个性状的小小改变，都会大大改变另一个物种的适应性地形。该系统就容易发展成混沌状态。反过来，当物种间相互联系的值（ C ）足够低时，该生态系统就容易发展成有序状态。基于大体相同的道理，如果我们使 K 和 C 的

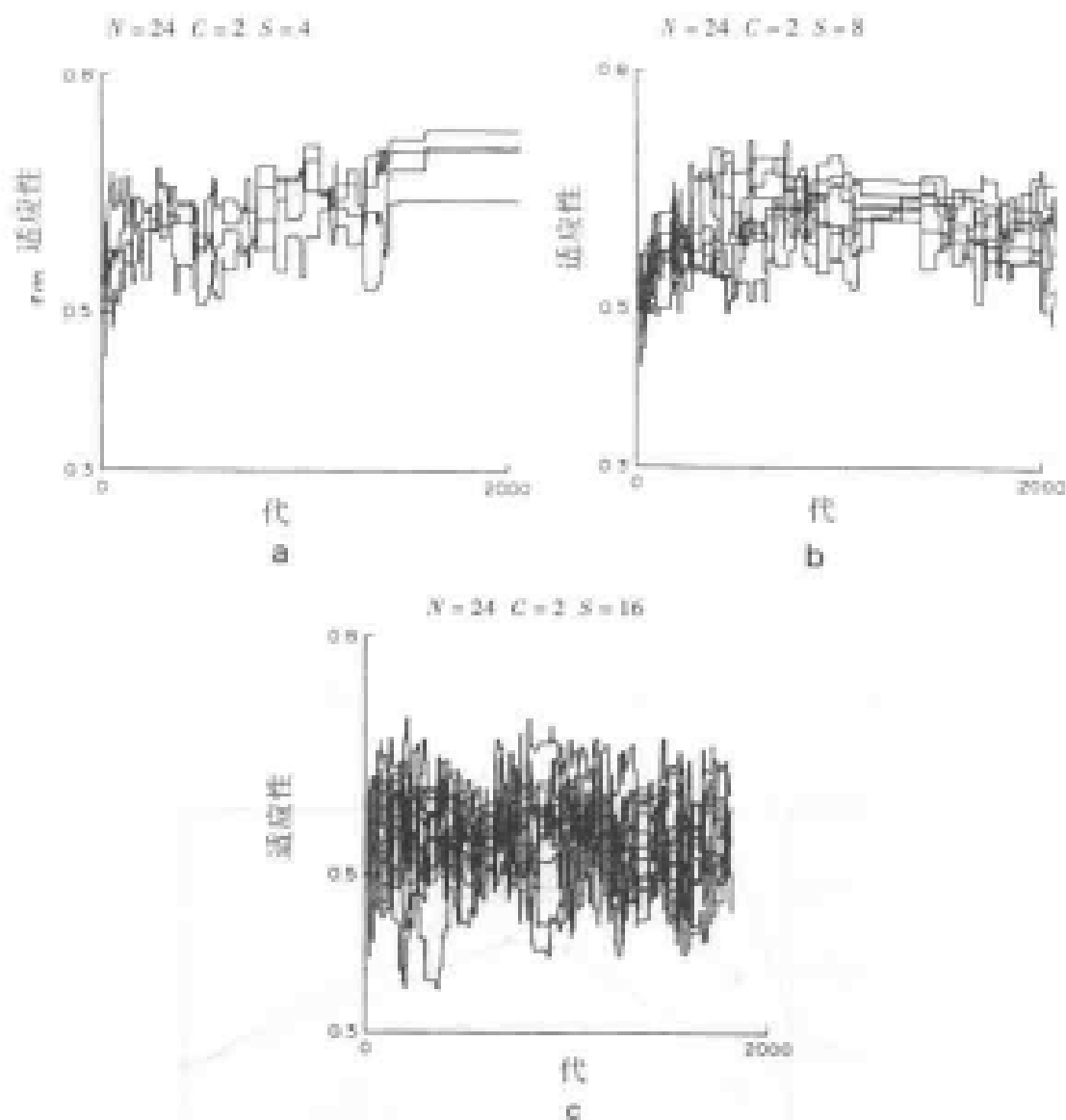


图 10.4 红后效应。图 a、b 和 c 分别有 4、8 和 16 个物种在共同进化。注意随着物种数量的增多，平均适应程度降低，而适应性波动加大。对于 b 和 c，经过 8000 代，未能达到进化稳定阶段。这些系统一直处于混沌的红后行为。

值保持不变，而改变与某个物种直接相联系的物种的数量 (S)，就会发现，当 S 的值低时，系统倾向于有序，而如果 S 的值较高，则系统倾向于混沌 (图 10.4)。

到这里，你也许会有种顿悟。如果对应一组参数的是混沌状态，而对应另一组的是有序状态，那么如果我们调整这些参数，会出现什么情况呢？某个系统如何从有序走向混沌？对于共同进

化的生态系统来说，什么样的参数可以使得所有物种的平均适应程度最高？

第一个有趣的结果，是随着 x 轴上的参数 K ， C 和 S （相对应物种的数量）的变化，从混沌变为有序，平均适应程度先是上升，而后再下降。当有序 - 混沌轴上的参数值位于中间的时候，即既不极度混沌，也不特别有序，则相关物种的平均适应程度最高。图 10.5 所表示的是某个物种仅仅是内部的上位相互作用 K 的值发生了变化，而 C 和相关的其他物种的数量则保持不变。为什么在有序 - 混沌轴上，当取值位置趋向两端的时候，生物的适应性最低？深入到混沌状态内部，适应性或升或降，毫无规则，其平均适应程度很低（图 10.4c）。而在有序状态中， K 的值很高：物种的基因组联系紧密，每个生物都陷入相互对立制约

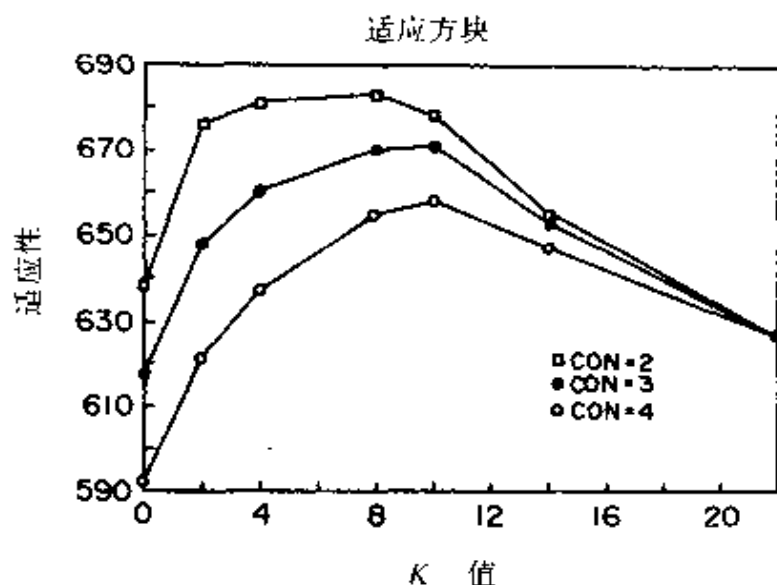


图 10.5 调节生态系统。随着物种之间上位联系 K 值的不断增加，即可调节生态系统，使其从混沌状态转为有序状态，其平均适应程度开始时升高，接着又降低，在 2 个极端的中间部位，平均适应程度达到最高。该实验是在 1 个 5×5 的成方格状排列的生态系统上进行的，在里面，25 个物种最多可以和 4 个其他的物种相互作用。（位于 4 个角上的物种和另外 2 个相互作用 [CON=2]；位于边上的物种和另外 3 个相互作用 [CON=3]；位于内部的物种和另外 4 个相互作用 [CON=4]。 $N=24$ ， $C=1$ ， $S=25$ 。）



的网络，结果出现很多低适应程度山峰，是这种相互冲突制约的产物。因此在有序状态内部，平均适应程度也不高。这样一来，在有序-混沌轴上，当取值居中时，适应程度达到最高。

事实上，我们的仿真试验表明，最高的适应性恰恰是位于有序和混沌状态的正中间！我们是如何知道这一点的呢？通过观察判断某个生态系统进入进化稳定阶段的难易度，就可以判断该系统在有序状态中的地位。拿 100 个相似的系统来做实验，观察每个系统何时达到 ESS 状态，停止共同进化。经过一定世代之后，50 个相似的生态系统各自进入了 ESS 状态（图 10.6）。将这一数字作为这种生态系统模型进入稳定状态的平均值。对于无序系统，这个数会很大；对于有序系统则很小。图 10.6 表明，我们的生态系统模型经历了 200 代。物种间的配对关系值（C）一直

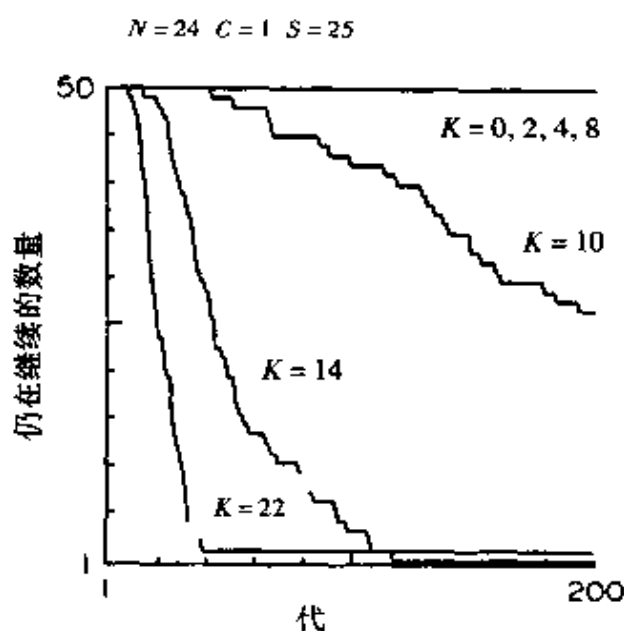


图 10.6 混沌的边缘。本图显示了在书中讨论的 5×5 生态系统中随着时间的流逝，没有进入稳定状态的一小部分。请注意，在混沌状态中（ $K < 10$ ），所有的生态系统在经过 200 代之后，都没有进入稳定状态。而在有序状态中（ $K \geq 10$ ），有不少甚至大多数系统达到了纳什平衡，而且随着 K 值的增加，此过程更快。因此当 $K = 10$ 时，生态系统处于混沌的边缘，在有限的 200 代以内，正好能开始进入稳定状态。



保持为 1。在我们设计的 5×5 方格矩阵中，每个物种和它东南西北四个方向的相邻物种形成配对关系。随着每个物种内部的上位相互作用 K 的值从低 ($K=0$) 变高 ($K=22$)，生态系统就由混沌变得有序。图 10.6 表明，当 K 的值高时，生态系统模型迅速进入 ESS 平衡状态。当 K 的值为 8 或者更低时，生态系统处于混沌状态，在 100 个类似的系统模型中，没有 1 个在经历了 200 代后发展到 ESS 状态。这里需要注意的关键一点是：当 K 的值从 8 升到 10 时，有一小部分系统经过 200 代进入了 ESS 状态。因此当上位相互作用 K 的值为 10 时，生态系统在经历 200 代的时间跨度之后，就开始进入稳定状态，此时它处于有序和无序之间。

现在如果对图 10.5 和图 10.6 进行分析，我们可以发现在混沌—有序轴上的中间位置，平均适应程度达到最高时， K 的值正好为 10，而且正好位于有序和混沌状态的中间位置！适应程度的平均值正好出现在从有序向混沌转变时。在有序状态内部深处，由于存在互斥制约因素，适应性高峰的值比较低。而在混沌状态深处，适应性高峰的值很高，但是数量太少，位置变化也太快，物种难以找到并攀到峰顶。在转换阶段，从坐标轴上看，适应性高峰正好位值合适，物种有充裕的时间攀到峰顶。这里，峰顶同时也可能是出现的最高峰，在现有的时间内，物种也能够达到。因此有序和混沌的转化阶段似乎正是整个生态系统的平均适应水平最优化的时候。

这里是否可以找到一些暗示，引导我们得出某些普遍的法则？有序和混沌状态之间的转换区域对于共同进化的系统来说，是否是“好”的状态？另外，进化过程中自然选择那无形的手，能否自动调节共同进化的系统，使之进入这个状态？现在，我们可以更进一步，来探讨共同进化过程本身的进化了。

一位年轻同事，凯·诺伊曼 (Kai Neumann) 和我一直在研



究，在何种情况下，共同进化的物种会自发地进化，进入平均适应程度最高的状态。我们设想有一个生态系统模型，其中 N 和 S 的值固定不变，即物种数量和与每个物种相互作用的其他物种的数量保持不变。跟以前一样，我们允许每个物种在自身发生改变的适应性地形上进化。另外，我们假定每个物种都可以改变自身内部的上位对应水平 K 的值，从而改变自己的适应性地形的复杂性。最后，我们还允许物种出现灭绝。为了做到这一点，我们设想每个物种的每一代都能经历下面四项中的其中一项：

1. 保持不变。
2. 使一个基因突变，在自身的适应性地形上移动到相邻的一点。
3. 通过加 1 或减 1，改变自身每个基因的 K 值，改变适应性地形的复杂性。
4. 此生态系统中的随机选择的物种，它自身的一个副本可以“侵入”所讨论的物种的小生境。

物种和东西南北四个相邻的共同进化的伙伴把上面所说的四种可能性一一试过。在这四种可能性中，能得出最高适应性的胜出：

1. 如物种未发生突变，只是由于它生在东南西北四面的相邻物种所创造的小生境中，而成了最适者，这样不会发生变化。
2. 如果物种仅仅有一个基因突变，而成了最适者，表明该物种在自身的适应性地形上前进了一步。
3. 如果改变 K 的值使物种变成最适者，那么该物种保持了原来的基因型，所改变的只是自身适应性地形的复杂程度。
4. 如果侵入者是最适者，则最初的物种就会灭绝，侵入的物种会占据原物种的小生境，并与其东西南北四面的物种共同进化。

这可真是个残酷的世界。



系统开始时，我们可以让所有物种 K 的值很高，这样它们就是在非常复杂的适应性地形上进化；或者是让 K 的值非常低，使物种在非常平缓的适应性地形上共同进化。如果 K 的值保持不变，那么在 K 值很高的有序状态深处，物种很快就会发展进入 ESS 状态；也就是说，物种会爬上本地域内并不很高的适应性峰顶，不再移动。在第二种情况下， K 的值很低，系统处于混沌状态，物种永远无法达到适应性的高峰。这样一来，进化就永不停歇，不过，由于这时物种可以改进它们自身适应性地形的复杂程度，而且总是有其他物种在试图侵入另外的小生境，一旦成功，这个旧的小生境内就会出现新的物种，彻底破坏任何业已达到的 ESS 状态。

运行此仿真模型，所发生的一切既使我们好奇，又使我们惊讶。不论如何启动这个生态系统模型，不论为所有物种赋予怎样的 K 值，该系统都趋向于得出最优的处于中间状态的 K 值，使得平均适应程度处于最高，且物种的平均灭绝率最低！共同进化的系统似乎可以通过一只无形的手，进行自我调节，使每个物种的 K 值达到最优。

图 10.7 和图 10.8 显示的就是这一结果。每个物种都有 $N = 44$ 个特性，因此上位关系最高为 43，适应性地形是随机的；或者最低为 0，适应性地形有如富士山。经过多个世代，共同进化系统的 K 平均值趋向于一个中间数，其范围是从 15 到 25，而且在大多数情况下，适应性地形的复杂程度保持在这一狭小的范围内（图 10.7）。在这里，适应程度很高，物种确实达到了 ESS 平衡状态，所有的基因型都在相当长的时间内停止变化，直到出现外来入侵者，打破这种平衡，使一种或者更多相互适应的物种趋于灭绝。

某一物种的灭绝，可能使该生态系统的部分或者全部物种受到影响，引发规模或小或大的连续灭绝事件。一个物种灭绝，就

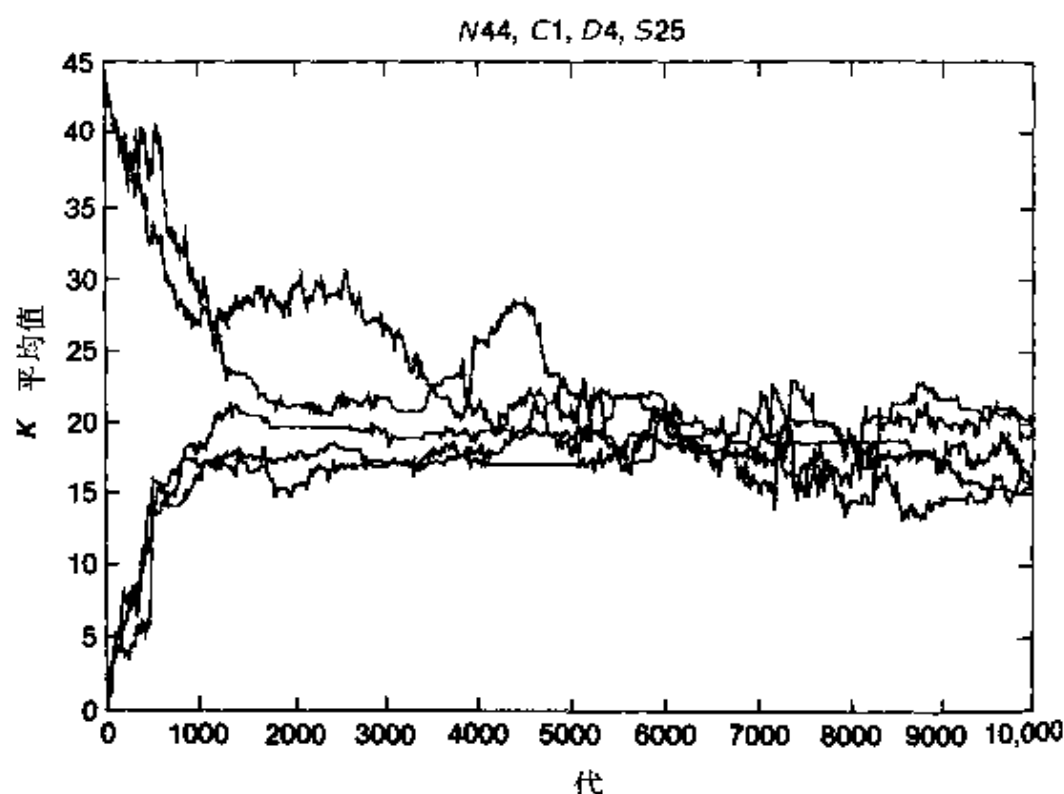


图 10.7 共同进化过程本身的进化。在这里，多个发生进化的生态系统模型， K 的初始值不同。经过一代一代的进化， K 值越来越靠近某个中间区域，处于有序和混沌之间。结果是平均适应程度增加，生物灭绝事件减少。生态系统似乎通过一只无形的手进行自我调节，使每个物种的 K 值达到最优。

会被某个侵入者取代。对于它所侵入的小生境，侵入者是外来户，肯定不处于本区域的进化顶峰，因此会以新的方式调整自身，改变其基因型。这些行为会改变它东西南北四个方向上的相邻物种的适应性地形，而且往往是降低它们的适应程度。这样一来，这些相邻物种往往会成为侵入者手下的牺牲品，走向灭绝。

灭绝事件的规模，是以在某个灭绝事件中灭绝的物种数量来衡量的，它也似乎呈幂律分布（图 10.8）。如果把灭绝事件的规模的对数放在 x 轴上，而把每种规模的灭绝事件的次数的对数放在 y 轴上，所得到的基本是一条直线，其中小规模灭绝次数多，大规模的次数少。事实上，即便 K 的值固定在很高或很低的程度，对于这种生态系统模型，灭绝事件的分布也符合幂律

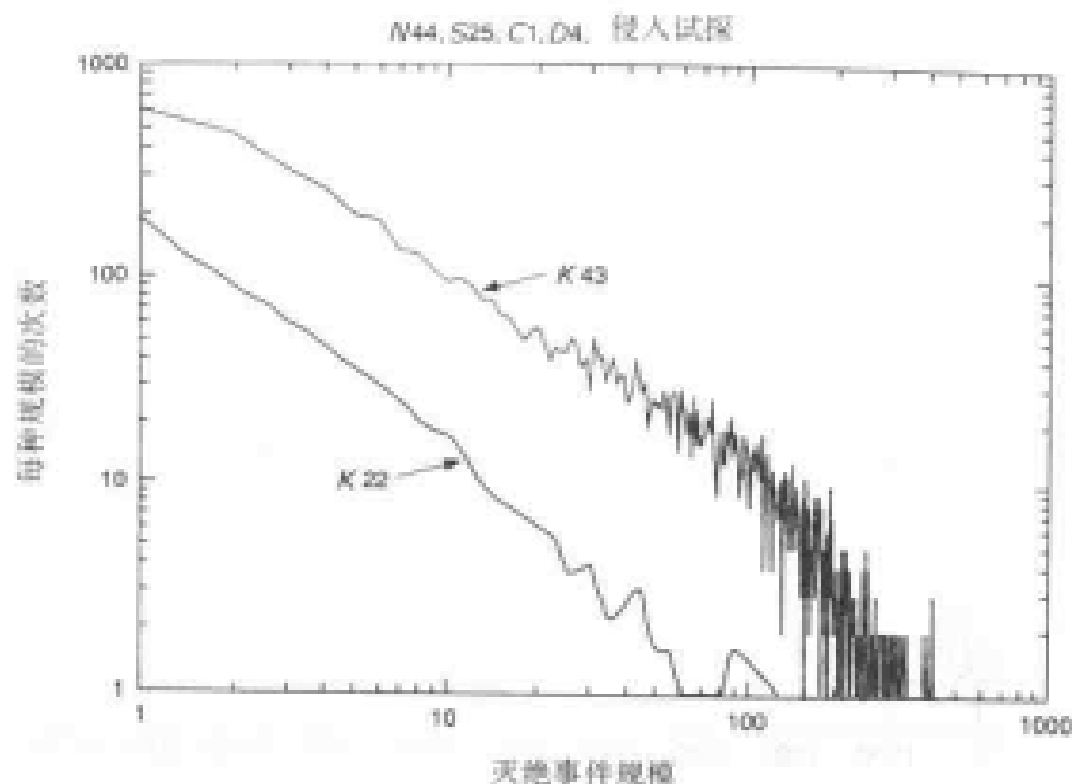


图 10.8 控制物种灭绝事件。这里用对数表示假设的灭绝事件与不同规模的事件的次数的关系。其结果符合幂律分布。在上位分布中，有一个生态系统被人为地定得很高， $K=43$ 。在这个区域内，由于存在相冲突的制约，适应程度比较低，因此在该系统中，充满了大规模的物种灭绝事件。当生态系统的适应性地形的复杂程度，其 K 值被赋予中等大小的时候（ $K=22$ ）时，低一级的幂律分布规律与此系统相对应。此时出现的灭绝事件规模小、数量少。

分布。

当 K 的值较高或较低时，在有序状态的深处或在混沌状态的深处，生态系统模型内部都充斥着大规模的灭绝事件。这些事件规模巨大，表明在有序状态深处适应程度很低，因为 K 值较高，存在很多互斥制约因素；而在混沌状态深处，适应程度也很低，因为适应性程度起伏不定，波动明显。在任一种情况下，物种的适应程度低，使得它们极易受到侵入者的影响，并容易灭绝。有趣的是，如果共同进化的系统可以调整自身的 K 值，它总是能通过这种调整，使平均适应程度达到最高。这样一来，物种就不易受侵入者的影响，也不易出现灭绝，因此灭



绝事件特别少。图 10.8 所表示的就是这一情况，并且对比了在有序状态深处灭绝事件的规模分布情况和总数以及当系统进行了自我调节，优化了适应性地形的复杂程度、 K 值以及适应程度之后的情况。生态系统进行自我调节之后，灭绝事件符合幂律，其曲线和在有序状态深处的相似。但是经过同样多的世代之后，在每个规模层次上，所出现的灭绝事件少得多。跟处于混沌状态深处的生态系统相比，自我调节的生态系统中的灭绝事件也少得多。简言之，生态系统通过自我调节将灭绝事件发生的几率降到最低！好像有只无形的手在控制着这一切，所有共同进化的物种，似乎都努力改变自身进化所处的适应性地形的复杂程度，因此，所有的物种都能够达到最高的适应程度，尽可能久地存在下去。

我们还无法弄清楚，这只无形的手究竟是如何起作用的。到目前为止，我们最接近事实的猜测是这样的：我们已经观察到，经过 200 代的时间跨度，平均适应性被优化为 K ，使得所有的物种在有限的时间内都能够达到适应性的最高峰。在这一时间跨度内， $K=10$ 的生态系统也达到了顶峰，进入 ESS 状态，此后物种在本区域的最高峰上停下来，不再变化。在那个实验，我和凯将时间跨度设定为 200 代。而目前，我们不再设定时间跨度。可能出现灭绝的生态系统模型进行自我控制，设定时间跨度。

这一点是如何做到的呢？当物种侵入到某个小生境，使得其中原有的物种走向灭绝，这一新的物种倾向于破坏任何原有的物种已经达到的进化稳定。因此假如不发生灭绝事件，本来会冻结在 ESS 状态的系统会给自己“解冻”。据猜测，我们的系统模型不可避免地要设置自身的时间跨度，而且设置时还保持高度一致。它自我调节适应性地形的复杂程度，使物种正好可以达到适应性的高峰，且使整个系统在受到灭绝事件破坏的情况下，能比



通常的速度稍微提前进入 ESS 状态。如果由于 K 的值较高，而适应性地形的复杂性也较高，物种就能够更快地进入 ESS 平衡状态，但同时也更易出现灭绝，因为整体的适应程度比较低。如果 K 值较低，因而适应性地形比较平缓，同时峰值较高，物种就会出现无序的波动，在有限的时间内无法达到 ESS 状态，因此更容易出现灭绝。而在平衡的位置，通常情况下，物种能较快地达到 ESS 状态，ESS 系统就能免遭突发的灭绝事件的影响，此时适应性可以得到优化，灭绝几率也降到最低。

现在我们就能够看见这只无形的手了。由某个优选规则 (Candidate laws) 控制着共同进化过程本身的进化，并不是不可能的。在共同进化过程中，生态系统可能自我调节，使自身处于有序和混沌的转换阶段，使适应性最大而平均灭绝比率最小，并产生规模有大有小的灭绝事件，对系统造成或小的冲击，或大的影响。我们每个人都是这个舞台上的一个演员，在台上或高视阔步，或手足无措，上演自己的角色，而后就销声匿迹，永不再现。但是我们可能盲目地集合起来，对舞台进行调节，使得每个成员，都有机会在舞台上尽可能长时间地展示自己。

沙堆和自组织临界状态

1988 年，诞生了一个简单的、美丽的，也许是正确的理论。我不断听到关于佩尔·巴克、唐超、科特·韦森费尔德 (Kurt Wiesenfeld) 以及菲尔·安德森和其他来自圣塔菲研究院的固态物理学者对沙堆和自组织临界状态等问题进行研究的传言。后来佩尔·巴克从他所工作的布克海文国家实验室 (Brookhaven National Laboratory) 来这里访问。我们从那时起就建立起彼此间的友谊，同时也开始争论不休。巴克不厌其烦地告诉我，自催化的装置是



不会正常运行的。经过两轮交火，之后又争吵了一阵，我终于说服他这是可能的。说服巴克可不容易，但是却非常有必要说服他，因为他非常有才华，有创造力。他和他的伙伴可能发现了一个非常普遍的现象，该发现和本书的许多主题都有密切关系：自组织临界状态。

我们可以想象有这么一张桌子。桌子的上方，有只手悬在那里，这只手和西斯廷教堂的天顶壁画上伸向亚当的上帝之手非常相似。这只手抓着沙子。沙子不断从手里流出，落到下面的桌子上，越堆越高，直到沙堆突然坍落，从桌子上落到下面的地板上。

往上堆沙子的时候，沙堆的角度逐渐到达稳定的临界，沙堆此时基本上到达了稳定状态。随着更多的沙子不断流下，就会出现许多小的坍落，以及一些大规模的坍落。但是由于是在桌子上堆沙子，一发生大的坍落，沙子就会落到地板上。

正如我们先前注意到的，如果有人记录这些坍落，就会看到我们业已熟悉的幂律分布现象。沙堆坍落的规模分布和生态系统模型中的物种灭绝事件的规模分布相似（图 10.8）。其中小的坍落较多，大的坍落较少。沙堆坍落的规模有可能是任意规模的。对于许多事物来说，比如人的身高，青蛙鸣叫的响声，都有典型的大小。而对于沙堆的坍落来说，没有典型的规模。估算人类平均身高的时候，测量的个体的人数越多，估算得就越准。而估算沙堆坍落的规模，测算的实例越多，所得的值就越大。最大规模受桌子大小的限制。如果桌子特别大，上面的沙堆也就特别大，我们就会记录到许多小型的坍落和比较少的大规模坍落。而如果观察的时间足够长，还可能看到规模异常巨大的彻底坍塌。所有规模的坍落都可能出现，但是规模越大，间隔就越长，这是由幂律规律所决定的。而且，坍落的规模和导致坍落发生的那个沙粒是不相关的。同样大小的沙粒，可能导致小规模滑落，也可能



导致一个世纪才得见一次的大规模坍塌。事件不论大小，都有可能由微小的动因诱发。不稳定的系统，无需重大的原因，就可能发生重大变化。

这就是巴克、唐和韦森费尔德所说的自组织临界。系统似乎是由无形的手进行自我调节，到达一个稳定的临界位置，之后，随着不断有更多的沙子落下来，沙堆就总是处于不稳定状态。

巴克和他的同事认为，物理和生物学中许多特性，甚至是经济领域，都呈现出自组织临界状态。例如，地震的规模是用里氏震级来测算的，该数值正好是地震释放的总能量的对数。地震规模的分布，也符合幂律分布规律，小地震较多，大地震很少。尼罗河洪水的规模，也符合幂律分布，小水灾多而大水灾少（稍后我将讨论经济方面的例子）。巴克甚至怀疑宇宙中的物体，如星系、星团是否也符合类似的幂律分布规律，是否也是小星团多，而大星团少，因为宇宙也处于继续扩张和最终的大坍塌之间。本书中，我们也已经见识了其他的处于危险中的系统和幂律分布特征：本地域的生态系统有可能处在亚临界和超临界状态，同时分子的变异不断出现。在混沌的边缘，遗传网络有可能发展成有序状态，基因行为的变化也符合幂律分布。我们也刚刚看到，有证据表明生态系统似乎是受无形的手的操控，进行自我调节，使自身处于有序和混沌的临界点，此时灭绝事件的分布符合幂律规律。

这一观点是否正确？目前我们尚不知晓。然而有不容忽视的线索表明，我刚才所描绘的图景也许是正确的。

有的线索与灭绝事件的规模分布相关。这种分布看上去的确基本和幂律分布吻合，但不那么紧密。目前所掌握的数据主要来自两个方面：一是从岩石中发掘出的生物灭绝的真实证据，另外一种是由汤姆·雷所进行的人工生命仿真试验中的灭绝事件（汤姆·雷是一位生态学者，研究哥斯达黎加的森林，同时也是圣塔



非研究院的常客)。

大卫·劳普分析了寒武纪以来 5.5 亿年的显生宙^①阶段，将其分成 77 个时期，每个时期的跨度为 700 万年。拉普将每一个时期灭绝的物种数量等数据收集整理起来。他发现灭绝事件中，小规模的多，大规模的少。图 10.9 显示的就是这种规模分布的对数统计图。大家可以看到，所得到的并不是一条直线，示意图中的线段出现了弯曲（图 10.9b）。其分布并不完全符合幂律分布。与小规模的灭绝事件相比，大规模的灭绝事件比我们料想的还要少。

什么因素导致了这些规模不等的灭绝事件？许多人认为，在白垩纪^②晚期，出现了一次异乎寻常的事件，导致了恐龙的灭绝。似乎是一颗巨大的流星坠入了墨西哥海岸（此地后来成为玛雅文明的发源地）附近的大西洋水域。人们找到了充分的证据表

① 显生宙阶段 (Phanerozoic Eon): 古生物学家把寒武纪及其之后的 5 亿多年的历史称为“显生宙”。显生宙分为古生代、中生代、新生代。古生代距今 5.4 亿年至 2.3 亿年，它包括 6 个纪：寒武纪、奥陶纪、志留纪、泥盆纪、石炭纪和二叠纪。这个时期生物种类繁多。中生代距今 2.3 亿年至 7000 万年。它包括了 3 个纪：三叠纪、侏罗纪、白垩纪。中生代恐龙极为繁盛，称霸一时。新生代距今 7000 万年，为哺乳动物的时代。它分为 2 个纪：第三纪、第四纪。虽然生物明显地发生于隐生宙某个时期，但是直到显生宙，形态才迅速发展和演化，并占领了可以达到的各种生态领域。显生宙巨大发展的关键在于植物能进行光合作用并放出游离氧进入大气。在显生宙期间，地球通过大陆漂移、造山运动、造陆运动、大陆冰川等，逐渐形成现在的形状和自然特征。因此，虽然显生宙仅代表地壳形成以来的 1/8 时间，但它的重要性远超过它较短的持续时间。在这个时期，世界各地普遍发生强烈的地壳运动，恐龙灭绝，哺乳动物开始大量繁衍，火山活动频繁，人类出现。——译者注

② 白垩纪 (Cretaceous Period): 距今 1.3 亿 ~ 0.65 亿年的地质年代，是中生代最后的纪。在欧洲许多地方，白垩是该纪特征岩石，白垩纪由此而得名。早白垩纪的陆生植物与侏罗纪的区别不大。白垩纪中期，被子植物大发展，晚白垩纪植物群就更接近于新生代。白垩纪的许多鱼类已接近于现代类别。陆地动物中恐龙居统治地位，发展了各种食性类别。它们在白垩纪末的灭绝是生物史上一大事件。——译者注

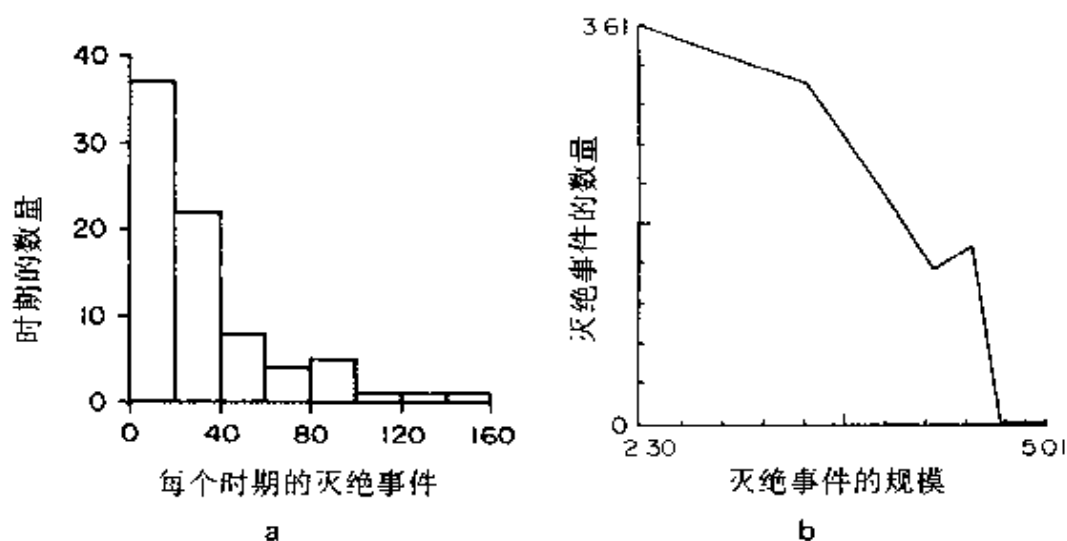


图 10.9 真实的情况。大卫·劳普分析了地质史上实际发生的灭绝事件，记录灭绝的物种数量。a. 他的数据表明，灭绝事件中，小规模的多，大规模的少。b. 将他所得的数据绘制成对数图表，其结果并不完全是幂律分布直线。大规模的灭绝事件比我们料想的还要少。

明这颗流星的存在。有些科学家认为所有的灭绝事件都是由这种外来的灾难引起的。小规模灭绝由较小的流星引起，而大规模的灭绝则由较大的流星引起。他们也许是对的。相反的观点认为，绝大多数的灭绝事件，可能是由生态系统内部的问题引起的，就像我们在模型中模拟出的那样。不论是小规模的，还是大规模的灭绝事件，实际上都可能由类似的极微小的原因诱发。我们所得到的结果，能充分地证明，我们不必分别为小规模和大规模的灭绝事件寻求小的原因和大的原因。

如果大多数的灭绝事件都反映了生物圈内部的问题，那么拉普的数据更符合处于有序状态的生态系统的情况，而不是处于有序和混沌的转换阶段。不过反过来说，77 条数据，并不足以令我们据此得出结论。能收集到详细到属或种的生物灭绝资料，而不是仅仅到科，我们才能得出所谓的结论。因此，我们根据他的数据所得到的，仅仅是线索，而不是结论。

汤姆·雷(Tom Ray)创造了一个人造世界，叫做 Tierra，用来



在硅片上进行生态学研究 (ecology in silico)^①。他开发了一个电脑程序，可以在电脑的核心“生存”。每个程序都能够自我复制，拷贝到内核中的附近区域。程序也能够发生变异，相互之间组成群落。在这个硅芯片搭成的舞台上，有许多鲜活的事件发生。像许多寄生虫一样，程序中也会出现一种东西，假借宿主的电脑指令，对自身进行复制。宿主对此所做的反应是建立边界将寄生物赶出去。寄生物可以进化成超级寄生物，越过宿主建立的边界。

但是一段时间之后，汤姆造出的这些东西就完蛋了。它们从他搭建的舞台上消失，杳无声息。我请汤姆绘制出 Tierra 中灭绝事件的规模分布规律。图 10.10 所示的，就是其结果的对数统计

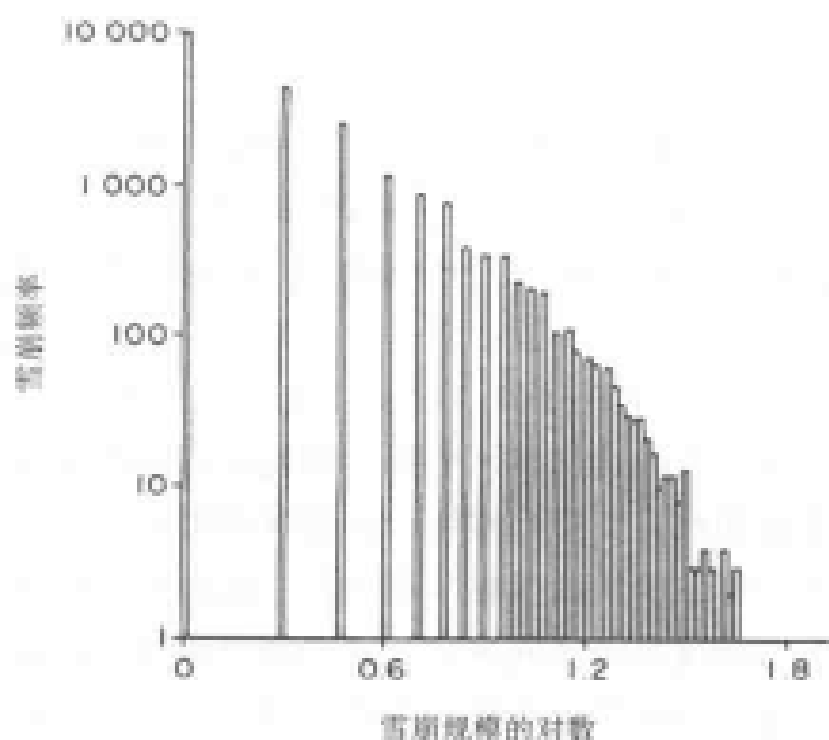


图 10.10 人工生命及其灭绝。汤姆·雷的 Tierra 仿真实验中，灭绝事件规模分布的对数统计图。

① “in silico” 研究技术，字面的解释是“硅片上的研究”，即利用计算机数据综合分析方法进行生物学研究。——译者注



图表：它基本上符合幂律分布，小型灭绝事件多，大型的少。和劳普获得的数据一样，线段是弯曲的。大规模的灭绝事件太少了。这可能反映了“规模限制”效应，因为雷为它们提供的内核空间就是那么大，因此灭绝事件也就只能那么大。据说二叠纪生物大灭绝使得 96% 的生物物种消亡了。规模不可能再大了。也许劳普数据的曲线偏离正是反映了整个生物圈的规模上限（图 10.9b）。

另外一个我们可以对之进行研究的特点也可以提供线索。由于此前出现了规模有大有小的灭绝事件和物种形成事件，因此每个物种、每个种或者更高的分类等级，都有确定的生存状态。物种从某个时间起源，又在某个时间灭绝。生物的种，开始于属于该种的第一个物种的出现之时，灭绝于该种的最后一个物种灭绝之刻。劳普分析了由古生物学者杰克·谢普考夫斯基（Jack Sepkowski）收集的反映了 17500 个属，500000 个种的无脊椎和脊椎海洋动物标本。劳普借此揭示生物的属的生存跨度的分布。图 10.11 显示了劳普的数据。在分布图上，数据急剧下降。大多数的属，在早期就灭绝了，但是有一个很细长的“尾巴”延伸到图表的右端。有的属生存了 1.5 亿年甚至更久。图 10.12 显示了凯·诺伊曼和我所做的仿真试验中，相对应的生存年代分布。两个分布图非常相似，下降都很快，但延伸得很长。大多数的属，在早期就已灭绝，少数的生存年代较长。我们尚不知晓，经过进化年代，生态系统是否共同进化，进入能自我调节的混沌边缘状态，但是灭绝事件的规模分布和生存周期分布为了解这个问题提供了线索。

某项规则，如果对生物体成立，对人造物品可能也成立。如果二者都由于受到相互冲突的因素的制约（我在第九章谈到了这一点），而在复杂的适应性地形上进化，那么二者可能会共同进化。大小公司和各种技术，也是在各自的舞台上，或昂首阔步，

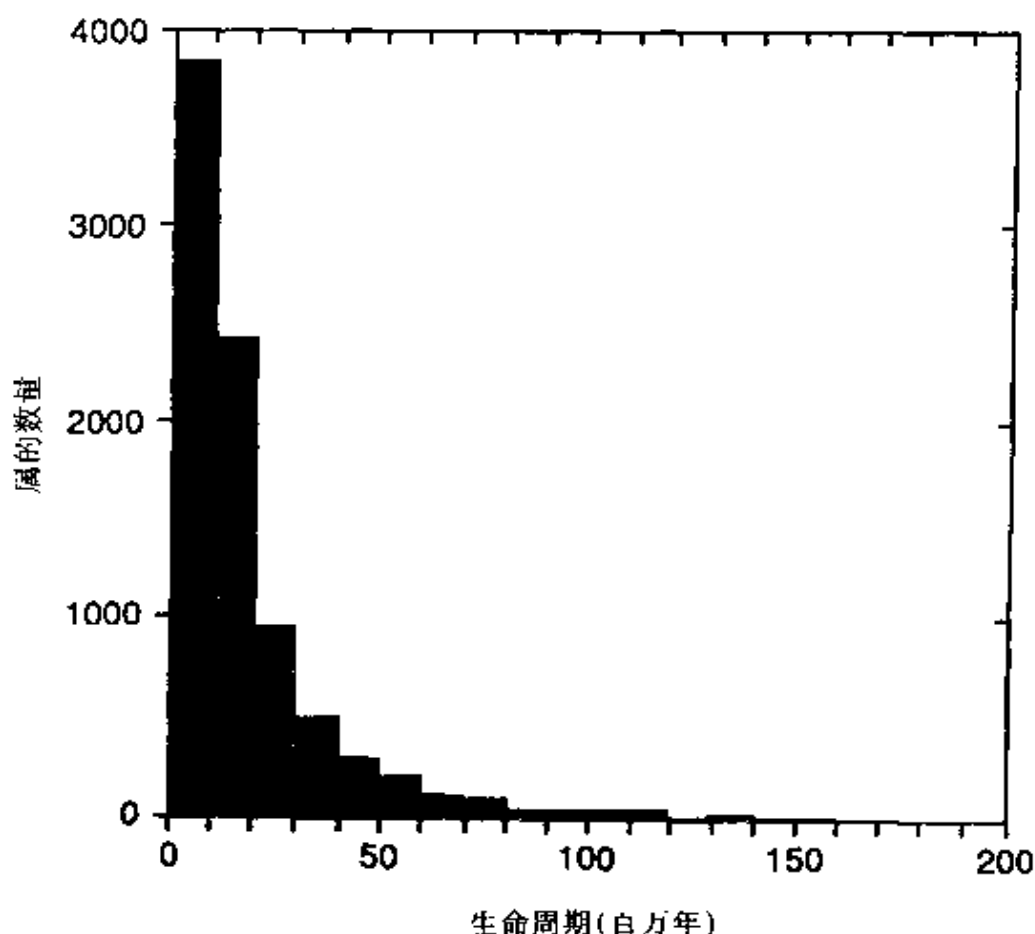


图 10.11 海洋生物早期的死亡率。此图显示了海洋中的脊椎和无脊椎动物的化石按照生命周期排列的情况。大多数的属早期就灭绝了，但是生存下来的物种，呈细长的尾巴形向右伸展。

或不知所措，过后就销声匿迹。汽车的到来，使得马匹作为交通工具消亡了。随马匹同去的，还有马车、马鞭子、钉马掌的铁匠铺、马具店、马具工匠等。随汽车而来的，有润滑油和汽油工业、汽车旅馆、公路、交通法庭、郊区、购物中心、快餐店等。生物通过进化，进而进入其他物种营造的小生境中繁衍生息。其中的一个如果灭绝，就会改变它所参与营造的小生境，可能就会导致邻近的某些物种的灭绝。不同的商品和服务，依存于其他商品和服务营造的小生境中。或者说，我们是依靠其他商品和服务提供的小生境，才能为了经济利益，制造并销售商品和服务。经

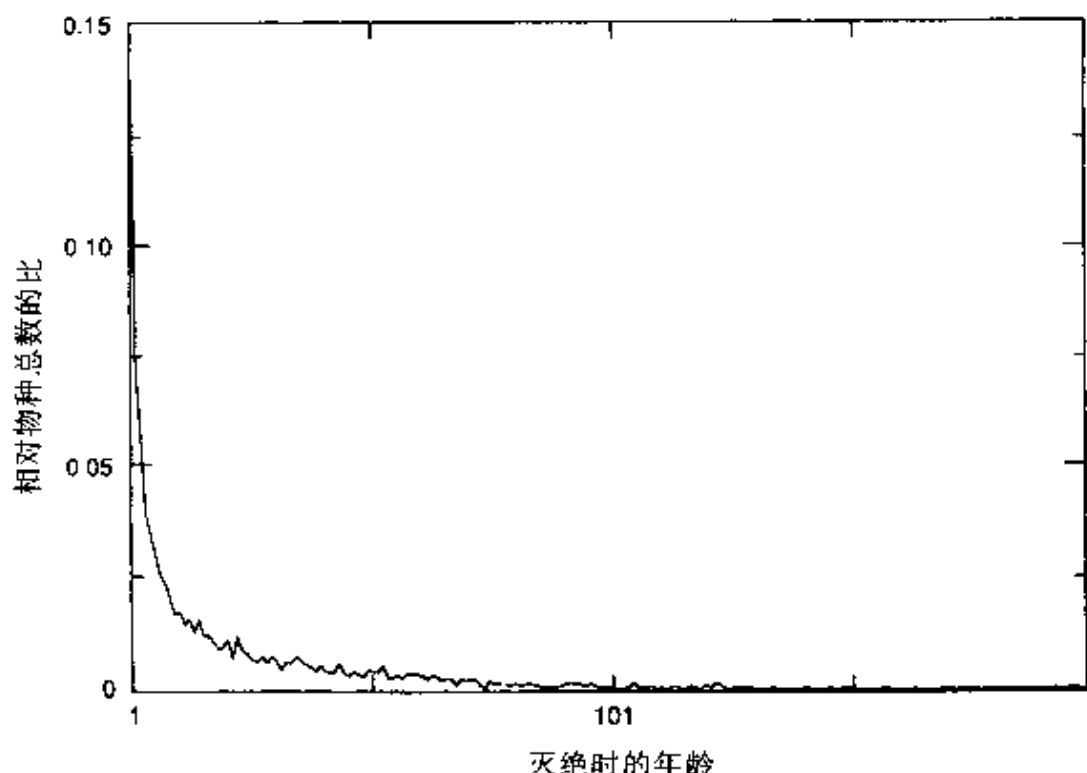


图 10.12 人造生命的早期死亡率。该统计图表示的是考夫曼和诺伊曼建立的模型中，物种灭绝时的生存周期相对于在每个生存周期灭绝的物种的数量和物种总数的比。

济体和生态系统一样，是共同进化的诸因素所形成的网络。澳大利亚的经济学家约瑟夫·舒彼得(Joseph Schumpeter)曾谈及所谓的“创造性破坏潮”。这种情况发生时，新的技术形式出现，旧的技术形式消亡。

我们知道，规模大小不等的技术革新会迅速波及整个经济体系。这些革新，是否也符合幂律分布，小革新多，大革新少？听起来似乎很有道理，但是我并不知道关于技术革新规模的详细分布情况。经济学家会谈起公司的消失比率，即公司从建立以来运营的周期函数。众所周知，新公司的夭折率很高。公司历史愈久，就愈有可能坚持下去。目前，尚无令大家接受的理论解释这一现象。但是我们可能会注意到，诺伊曼和我所研究的共同进化模型，正好和这一现象吻合。图 10.13 显示了在我们的生态系统



$N44, K1, S25, D4, C1, 2$ 侵入试探 1.0

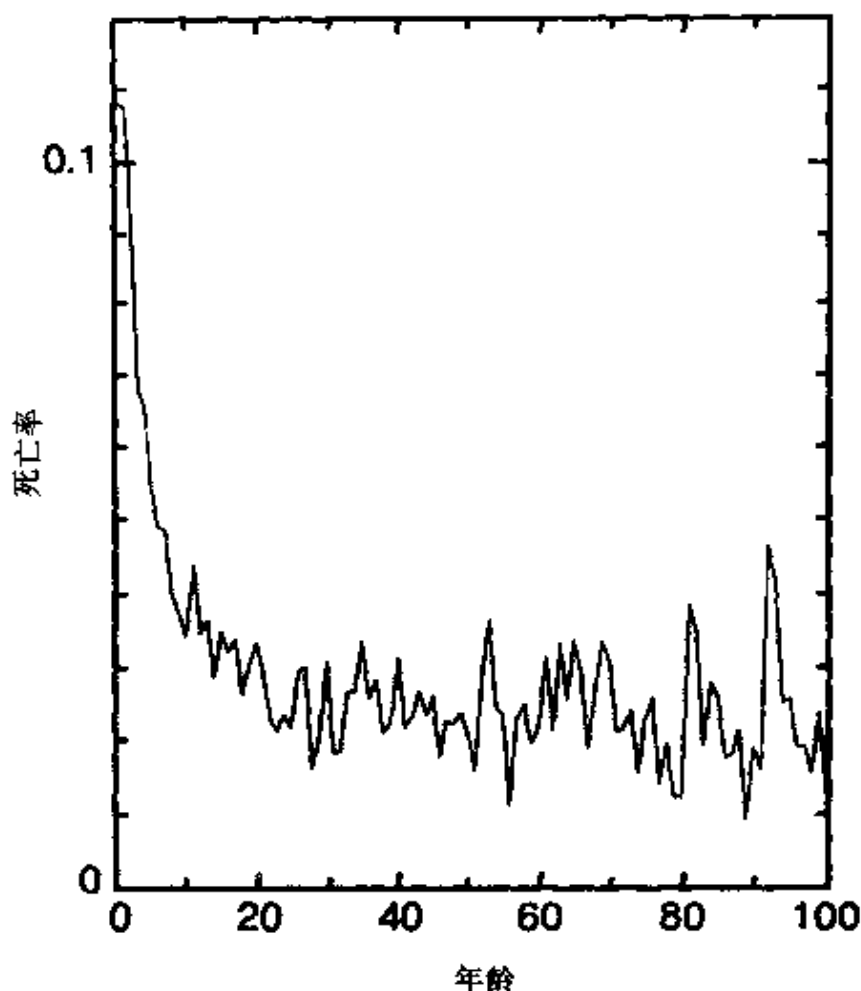


图 10.13 一生态系统模型中的死亡率。“物种”越年轻，灭绝的可能性越高。

模型中，随着生存时间的变化，消亡的可能性。新物种的夭折率高，而随着时间的推移，这一比率越来越低。为什么呢？可以把建立新公司当做侵入者进入一个小生境来考虑。乍一开始，在新的小生境中，新公司的适应程度较低，因此容易被另外的侵入者取代。另外，它的出现所带来的附近区域的共同进化的混乱，也许会使得自身的适应性在一段时间内都比较低，因此容易在早期夭折。但是随着它和它所在的区域逐渐发展进入 ESS 平衡状态，该公司的适应程度得到了提高。再有新来的入侵者，该公司在其



威胁面前抵抗力提高了。因此每过一段时期，它的死亡率都会降低，直到进入 ESS 状态。最终，有些公司还可能成功地侵入其他公司的领域，这样，该公司就会空前强大起来。当然，我需要直接的经济学的解释，比如资本运营、市场份额或者其他能够衡量公司是否成功的方式，才能使我的这种大略的描述符合经济领域的事实。公司成熟后，其资本会越发雄厚，市场份额增加。一旦站稳脚跟，就不那么容易关门歇业了。

生物体和工艺，其进化和共同进化方式，可能非常相似。两种形式的进化，一个是由瞎眼的钟表匠控制，一个是由我们人类控制，可能最终是由同样的普遍规律所控制着。也许，规模大小不等的灭绝事件，正如舒彼得所宣称的那样，波及整个经济体系，且符合幂律分布，也许，规模大小不等的灭绝事件也波及整个生物圈。也许，我们都是共同生存着，盲目地对我们共同参与的游戏和各自扮演的角色进行自我调整，直到进入自组织的临界状态。如果真是这样，那么佩尔·巴克和他的同伴们的发现就是一条了不起的规则，正如我们所认为的那样，那是一种新的生命哲学，正踮着脚尖，站在数学的沙堆之上。我们最细微的移动，可能会给我们生于斯长于斯，创造再创造的世界，带来细微的，或者是剧烈的变化。三叶虫来了，又走了；恐龙来了，又走了。每个物种都曾尝试，每个物种都努力向上，每个物种都曾攀登上自身进化的高峰。试想，99.9% 的物种，都是来了又走了。小心些吧。你自身迈出的脚步，就可能诱发某个灾变，将你永远带走；你、我、他，谁都无法预言，究竟是哪个微小的变动，会诱发微小的或是灾难性的变化。小心些吧，但是不要裹足不前。你别无选择。充分发挥自己的智慧，但是同样，要有足够的智慧认识到自己的无知。我们都尽力而为，最终不过是迈向自己的灭绝，为新的生命形式、新的生存方式，让出道路。

欢呼吧，为这个美丽的生命哲学。尽自己的所能，早晨起



来，来点咖啡和玉米片，穿过汹涌的人流，来到地铁站，拥进电梯，步入办公室，钻入别人早已钻过的文件堆，不管你的职业为你准备了何种向上爬的梯子，都竭力向上爬，而最终，你所得为何？不过是台上短短的一点钟。伙计，真是残酷啊，但是那些埃迪卡拉古生物的经历，也不比我们好。

这个世界不容我们乐观，但也不必悲观。也许这就是我们一直在猜测的现实。尽力而为吧。终有一日，你将会和三叶虫以及其他牛气哄哄的家伙一样，在这场逐渐展开的庆典中成为陈迹。在这场历险中，即使我们终将失败，能参与其中，也是莫大的快事。



第十一章 寻找完美

经济学家西德尼·温特（Sidney Winter）现就职于宾夕法尼亚大学沃顿商学院（the Wharton School），此前他曾在审计总署呆了四年，任那里的首席经济顾问。最近，在圣塔菲研究院召开的会议上，他做了关于“有组织进化”的发言，这立即就引起了我们的注意。毕竟，我们大多数都是学院派的科学家。西德尼谈了他在美国的中央机构工作期间所获得的关于全球经济生活变化的经历。他这样说道：“四个骑手控制着全局。”

这四个骑手分别是技术、全球竞争、经济重组和防御改革。正是这四者，控制着冷战后的世界。我们需要就业，好的就业机会，但是并不知道如何确保经济活动能够提供这些就业机会。医疗卫生、福利以及贸易政策等等都面临改革。但是我们不知道如何去改，也无法了解它们所带来的影响。美国公司提供的实际就业机会在减少。许多公司企业进行外部采办。企业不再生产产品的所有零部件，而是从其他企业，而且往往是其他国家的企业，采购这些部件。这导致了企业纵向组织结构的瓦解。并购行为将老的企业变成新兴的公司，旧的部门重新架构。我们面临贸易自由化。我们的规模在缩减。这一切都与一个共同的主题相连：重新包装。我们正把经济行为重新包装成更小的单位。常见的自上而下的集权化组织形式不再时兴。组织结构变得越来越在一个平



面上，越来越非集中化（decentralized）。

我倾听着，充满惊奇。全球的组织正变得不那么等级分明，正在平面化、非集中化，而且这样做，是为了能够提高适应性和竞争优势。

我想到，关于如何实现非集中化是否有比较系统的理论呢？我正在找寻一个令人惊异的新现象，新的混沌边缘状态的故事，这一切，都是受到了某种启发：为什么更平面化的、非集中化的组织结构，不论是政治、经济还是其他领域的，可能会更灵活，更能提高整体的竞争优势呢？

几周之后，我正在努力钻研这些东西，圣塔菲研究院在密歇根大学召开了一个“前哨”会议。会议的目的，是将圣塔菲研究院和密歇根大学两所学校关于“复杂性科学”的研究结合起来。计算机科学家约翰·霍兰（John Holland）是圣塔菲研究院和他所在的位于安娜堡（Ann Arbor）的密歇根大学的中间联系人。约翰对于“遗传算法”做出了重大贡献，这个算法结合了适应性地形理论、基因突变、重组和自然选择等理论，用来解决复杂的数学问题。而工程系主任彼得·班克斯（Peter Banks）则是该活动的领袖。他说：“在我们的企业中，正实行总体质量管理，把新型的模块小组整合到一起。但是对于如何将这件事做好，我们缺乏理论基础。也许圣塔菲研究院所做的研究，能够给我们提供帮助。”我不住地点头，希望如此，但是心里尚存疑虑。

为什么我，一个来自圣塔菲研究院的科学家，以及我遍布全球的研究复杂性科学的同事们，会对将自己的学问和商业、管理、政府及组织建立起潜在的联系感兴趣呢？生物学者、物理学者涉足这一新的领域，意欲何为？自组织和自然选择的主题，这个关于瞎眼的钟表匠以及那只无形的手的主题，他们在这个正在展开的生命画卷中，是如何协作，从最初的分子，到细胞，到生物体，再到生态系统，最后自发出现了人类的社会结构——所有



这些，都是植根于历史之中的规则的基点。埃希杆菌中的任何一个分子，都无从“了解”埃希杆菌所处的世界是何情况，而细菌可以照常生存。IBM 公司，如今正在缩减规模，组织形式也在平面化，它的任何一名员工，都不了解整个 IBM 的情况，但是集合在一起，IBM 就能正常运作。生物体、工艺技术和组织都是进化产生的结构。即使其中掺杂了人类有意识的计划，其中那个瞎眼的钟表匠所做的一切，也比我们通常所了解的要多。控制这些结构的出现和共同进化的规则是什么？

生物体、工艺技术和组织都是在复杂的、变化着的适应性地形上进化和共同进化着。生物体、工艺技术和组织，如果本身是复杂的，都将面临互相冲突的因素的制约。因此，如果它们试图通过某种妥协的方式实现进化，如果它们被设计为在峥嵘崎岖的适应性地形上寻找最高峰，就不足为奇了。另外，由于所有的可能性广漠无边，即便是人类，也是在盲目地寻找，这也就不足为奇了。国际象棋的策略实际上是有限的。但是任何一位国际大师，都不能在开局两步之后，就认为对手在走完后面的 130 步之后，不可避免地要将自己的军，而投子认输。尽管我们有主观意愿，但仍然是瞎眼的钟表匠。不论是细胞，还是首席执行官，我们其实都是盲目地在不断变化的适应性地形上寻找高峰，向上攀登。果真如此，则细胞、生物、商业以及政府组织等等所面临的突出问题，所有依靠其他组织营造的小生境而生存的组织面临的突出问题，都是如何在自身不断变化的适应性地形上进化，寻找变动不居的高峰。

在不断变化的适应性地形上寻找变动不居的高峰是生存的核心问题。简而言之，适应性地形也是寻找完美的一部分，是我们所能达成的最好的妥协。



分片模式

本章我力图描述近来与比尔·麦克里迪 (Bill Macready) 和艾米莉·狄金森 (Emily Dickinson) 合作进行的研究。研究结果既深刻又简单, 似乎能够帮助我们理解为什么平面化的、非集中化的组织结构运行更好: 不靠直觉, 而是把一个组织分成“小块”, 每个小块都为了私利进行优化, 即便这样做对整体是有害的, 最终, 就好像是受一只无形的手的支配, 这个小块会为整个组织带来利益。这里面的诀窍, 就在于如何分割出这些小块。我们会看到, 在有序状态中, 整个组织达成的妥协很差, 在混沌状态中, 则没有任何妥协, 而在有序和混沌状态的转换阶段, 则可以很快找到解决方法。我们将探索分块的逻辑。看着我将谈及的结果, 我不禁感到疑惑: 这些发现是否能帮助我们理解复杂组织是如何演化形成的, 能否帮助我们理解为什么民主政治是比较优秀的政治机制, 为什么它有助于协调民众所持的相互冲突的观点, 使之达成一致。

这一工作完全是建立在我们业已熟悉的老朋友, 即有关复杂适应性地形的 NK 模型上面的。正由于如此, 我们可以立即进入讨论过程。NK 模型只是复杂的、充满冲突的适应性地形中的一种。这里, 我们需要细心求证。例如, 我谈及的结果也将用于解决其他充满冲突的问题, 从设计复杂的人造物品, 如飞行器, 到制造生产设备、组织结构和政治体制等, 对这一结果目前我还不那么确定, 尚需对之进行更深入的研究。

NK 适应性地形是数学家所说的组合优化问题的一个例子。在 NK 适应性地形的框架中, 优化问题就是寻求全局性的最优状态, 即最高峰, 或者至少是出类拔萃的高峰。在 NK 适应性地形中, 基因型就相当于组合问题, 有 N 个基因构成, 且基因还有



0 或 1 的等位基因之分。因此随着 N 的增长，我们就会发现所谓的可能基因型的组合爆炸，因为基因型的数量是 2^N 。这里面有一个基因型是我们寻求的全部之中最优的基因型。因此随着 N 的值不断增大，寻找最优值就会变得十分困难。回顾一下，相互关联性的最高值为 $K = N - 1$ 时，适应性地形完全是随机的，且本地域高峰的数量是 $2^N / (N + 1)$ 。在第八章，我们讨论了寻找能进行某种运算的最大压缩算法，并且注意到，这种算法存在于随机的地形中。因此，为某个算法找寻最大压缩程序，就等于在这样的随机地形中，找寻一个，或者至多不过很少几个最高的山峰。另外，我们还可以回想一下，在随机的地形上，本地域内的攀登活动会很快被本地域内的高峰困住，而它们还远不是全球性的高峰。这样一来，找寻全球性的高峰，或者至少找到几个出类拔萃的高峰，就特别难于办到。我们必须穷尽所有的可能性，才能保证成功。人们将这种问题称为 NP 难题，意思是，找寻问题解决方法所需的时间和问题的可能性空间成一定比例，这里所需的时间由于组合爆炸，会呈指数增长。

进化就是发生在复杂的适应性地形上的搜索过程，这一地形或者固定不变，或者变动不居。没有任何搜索过程可以保证，对于某个 NP 难题，能用少于搜寻整个可能性空间所需的时间，找到全球性的高峰。另外，我们还反复注意到，这种搜寻所需的时间，是一个超天文数字。我疑心，真正的细胞、生物体、生态系统以及真正的复杂人造物和真正的组织，从来就没有在自身的固定的或变动的适应性地形上找到全球性的最优状态。真正的任务，是随着地形的变化，找到那些出类拔萃的高峰。我们的“小块”理论，似乎是帮助复杂系统和组织达到这一目的的一种办法。

在讨论小块逻辑之前，我想介绍一种众所周知的寻找不错的适应性高峰的步骤。这种办法叫做模拟退火（simulated anneal-



ing)，是由 IBM 公司的斯科特·科克帕特里克（Scott Kirkpatrick）和他的同事几年前发明的。他们选取了著名的推销员的行程难题作为试验中的组合优化问题。如果能解决这一问题，就等于解决了许多高难度的优化问题的关键部分。该问题是这样的：假设你是推销员，住在内布拉斯加的林肯市。你必须逐一走访内布拉斯加的 27 个城镇，然后回到家中。这里的难题是，你需要以最短的路程，完成你的旅行。

这就是问题的全部。有人会以为不就是开上自己的小破车，在车上的小冰柜里装上 27 顿午餐，开路就是了。小菜一碟。至少听上去不过如此。

如果城市的数量 N ，不是 27，而是增加到 100 或 1000，这碟小菜的复杂程度，就和那些超天文数字的难题不相上下了。看看吧，如果你从林肯市出发，你必须选择第一站城市，此时有 26 个选择。之后，就得选择第二个，此时有 25 个选择。依此类推。从林肯市出发的所有可能的线路总数是 $(27 \times 26 \times 25 \times \cdots \times 3 \times 2 \times 1)/2$ 。（这里除以 2 的原因，是沿每一条线路，你可以选择任意一个出发方向，除以 2 就排除了一条线路走两遍的可能。）

有人可能以为，应该有更简单的方法来寻找最短线路。这似乎希望不大。实际情形似乎是，如果你想找到最短路线，就得把所有的路线都考虑到。随着城市数量的增多， N 的值变大，你面临的问题，就成了那种可能性组合爆炸，正是类似的原因，使得基因型空间和其他的组合空间变得无比巨大。即使用最快的电脑，也不能保证在人类或宇宙的有生之年，能找到最短的路线。

实际上，最好的办法，也是最现实的办法，是找出一条相当好的线路，而不是最最好的。毕生追求卓越的推销员必须接受不那么完美的结局。

如何才能退而求其次，找到一条比较优越的路线呢？科克帕特里克和他的同事们在他们的模拟退火理论中，给出了一个有力



的解决方案。首先需要确定一个适应性地形，或称作成本地形。接下去就搜索整个地形，寻找好的线路。这里所讨论的地形很简单，就是需要去的 27 个城市和所有可能的线路。如我们所分析，可能的线路非常之多。接下来就需要判断哪些线路相互“靠近”，就像对于基因型来说，我们提出了邻近突变基因型的概念。进行这个判断，其中的一个办法，是考虑一种“交换”途径，将某个线路中 2 个城市的位置对换。比如我们的线路是 ABCDEFA，如果将 C 和 F 对换，线路就成了 ABFDECA（图 11.1）。

一旦定义好了什么是“相邻线路”，就可以在一个高维度的

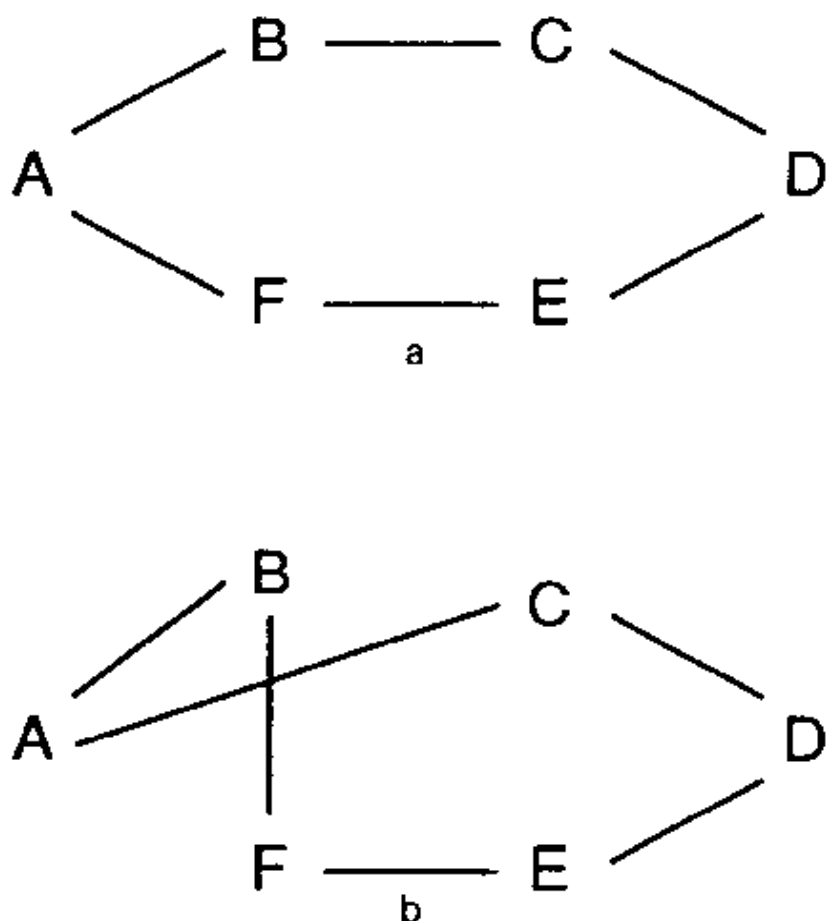


图 11.1 推销员的行程难题。推销员需要找到途经数个城市的最短线路。

a. 推销员途经 A—F 6 个城市。b. 将 a 中的两个城市对调，得到一条和 a “相邻”的线路。



空间内，排列所有的线路，这一空间和基因型空间很相似，在里面，每个线路都和它所有的相邻线路紧密排列在一起。想展示一下这个高维度空间非常困难。我们来回顾一下在 NK 模型中，每个基因型，比如 (1111)，都是布尔超立方体中的一个顶点，并与另外 N 个基因型相邻：(0111)，(1011)，(1101) 和 (1110)。基因型会不断进行适应性“行走”，从一个基因型到邻近的基因型，直到达到本区域内的最高峰。在线路空间内，每条线路都位于一个顶点，由一条线段，与它所有邻近的线路连接在一起。由于我们是在寻找从林肯市出发途经所有 27 个城市，最后回到出发点的最短线路，我们也就有理由从成本的角度来考虑线路的长短问题。由于每条线路都有成本，我们就可以得出一个成本地形图。由于我们是要将成本最小化，而不是将适应性最大化，在这个成本地形上，我们就需要寻找最深的山谷，而不是最高的山峰。不过很明显，二者的道理是一脉相承的。

跟任何其他复杂的地形一样，线路空间以各种不同的方式相关。即相邻的线路往往具有同样的长度和同样的成本。如果是这样，借助相互关系找寻好的线路就是聪明之举，即便还是找不到最好的线路。回想一下，在第八章，我们找到了许多复杂地形的一个普遍特点：最深的山谷，会将最大区域内的水汇集起来。如果我们将这里所说的山谷，看作山区那真正的山谷，就可以想到，从各个地方发源的大部分水流，会流向这个山谷。我们将看到，这是模拟退火的一个根本特点。

试想一滴水，或是一个球体。一旦它到达了本地域内的最低点，它就会永远陷在那里，除非是受到外力作用才会出现变化。也就是说，不论是向上攀登适应性高峰，还是向下寻找最低成本，如果我们仅仅能采取一些步骤改善目前的状况，那么很快就会被困住。但是这个困身之所，与真正的最低和最高程度相比，可能根本算不得什么。因此，下一个问题，即如何脱身。



真正的物理系统，有完全自然的方式，帮助它从不好的本地域最低点脱身。有时候，它们随机选择的线路，方向可能是错误的，该向下的时候反而向上。这种随机的动作，是由热振动引起的，能够从其温度上测知。

假设有这么一个系统，里面分子互相碰撞，相互发生作用。碰撞的几率取决于分子的速率。温度是测量分子平均动能的标准。温度高表明分子处于强烈的随机运动状态。温度为绝对零度时，表明分子完全静止不动。

在高温状态下，物理系统在其可能的结构空间里冲撞，分子相互撞击，交换动能。这种冲撞表明，该系统并不直接向下进入本地域内能量的最低值，而是能够通过提高温度的可能性，向上跳跃，穿过“能量障碍”，进入附近的能量盆地的最低点。如果温度更低一些，系统就不大可能越过任何的障碍，而是更有可能待在目前的能量“深井”中。

退火就是一个降温过程。真正的物理退火，就是逐渐降低一个系统的温度。将一个正在锻打的铁块，反复置于冷水中，然后再加热锻打，这就是实际的退火过程。经过退火和锻打，铁的原子构造被重新排列，原子放弃了不好的、相对不稳定的本地域的最低点，而稳定在低能量的最低点，从而变成了更坚硬、更结实的金属。在反复的加热和锻打过程中，铁块的微观构造先是徘徊于所有的结构空间，不断超越本地域内的能量最低点之间的能量障碍。当温度降低的时候，想超越这些能量障碍就越发困难。这里我们遇到了一个关键的假说：如果能量最低点汇集了最大的盆地内的水流，那么随着温度的降低，微观构造会很容易被最大的盆地困住，其原因就是由于这是最深、最稳定的能量最低点。通过退火锻造铁器，可以得到坚硬、强度高的金属，因为退火可以使原子结构进入能量最低点。

仿真退火依据的是同一原理。在推销员行程问题中，如果相



邻的路线更短，我们就选择相邻路线。但是，也有可能是我们选择的方向是错误的，即相邻路线距离更长，成本更高。选择错误线路会增加成本。固定幅度的成本增加的可能性，是由系统的“温度”决定的。在仿真实验中，算法搜索所有线路的可能性空间。降低温度，就可以降低选择错误路线的可能性。渐渐地，算法会找到理想的最低点。

仿真退火过程是解决充满冲突的问题的有趣方法。实际上，它是目前我们所知最好的方案之一。但是该方法也存在重大的限制。首先，寻找好的解决方案，需要非常缓慢地“降温”。找寻好的最低点所需的时间很长。希望弄清楚人类及其组织如何找到实际生活中某些问题的解决方案，考虑使用仿真退火和类似方案还有另外一个明显缺陷。比如对于正奔赴战场的飞行员来说，他面临的形势瞬息万变，且有生命危险。在这个充满冲突因素的地形中，飞行员必须迅速做出判断，选取能确保胜利的战术。要他在战火纷飞中，不断试验降低错误率，直到找到最好的战术，这种办法恐怕不能使我们的飞行员满意。人类组织也不可能采取类似的方式进行优化。欲寻求高难问题的答案，仿真退火似乎是理想的方案。在实际生活中，我们从不反复试验。我们根本就不耗费精力去有目的地出错，以便逐渐降低错误率。我们总是尽力而为，不过常常是以失败告终。

我们是否曾设计出过某些作用良好的步骤？我想我们确实设计出过这样的东西，名目繁多，从联邦政治，到效益中心，到重组，到支票，到政治分权。而这里我称之为小块或小片。

分片过程

分片过程的基本原理很简单：把一个困难的、充满冲突的、由许多相互作用的部分组成的任务，分割成不相重叠的小片。就



每个小片寻找优化方案。优化某片的时候，由于在这片的边界周围的其他各片和这一片存在相对关系，因此，在一片当中找好的解决方案就会改变相邻各片中需要解决的问题的性质。由于每一片一发生变化，都会改变相邻各片所面临的问题，那些片中发生的变化又会进一步改变另外一些片中的问题，这就和我们讨论的共同进化的生态系统有了相似之处。每一片，都相当于我们在第十章中所说的一个物种。每一片都需要在自己的适应性地形上攀登上进化的高峰，但是在这么做的同时，会改变与之相邻的各片的适应性地形。正如我们所见到的，这一过程有可能失控，出现红后混沌状态，永远无法产生任何好的整体结果。在这个问题上，如果出现混沌状态，就等于说这个系统成了变动永无停歇的乱七八糟的一团。相反，而对于进化稳定状态（ESS），即有序状态来说，我们的系统可能完全停滞，陷于并不出众的本地域高峰。而如果将生态系统置于混沌和有序之间，就能达到最高的平均适应程度。我们将看到，如果整个充满冲突的任务，在分割成适当大小的小片之后，共同进化的系统就会处于有序和混沌的过渡阶段，并很快找到很好的解决方案。简单说来，分片方式可能是我们在社会形态系统中，也可能包括其他领域，演化出来的一项用来解决复杂问题的最根本办法。

现在你对 NK 模型已经有所了解。它所包括的是一个包含 N 个部分的系统，每一部分都根据自身的状态以及另外 K 个部分的状态，对整体产生“适应性作用”。我们把 NK 模型置于一个点阵体系中（图 11.2）。这里每个部分所处的一点，都在东南西北四个方向跟相邻部分紧挨着。和以前一样，我们允许每一部分可以处于两种状态之一：1 或 0。每一部分都根据自身的状态以及位于它东南西北四个方向的相邻部分的状态，对整体产生“适应性作用”。适应性作用的取值是从 0.0 到 1.0。我们另外规定，整个点阵的适应性就是每个部分的适应性作用的平均值。比

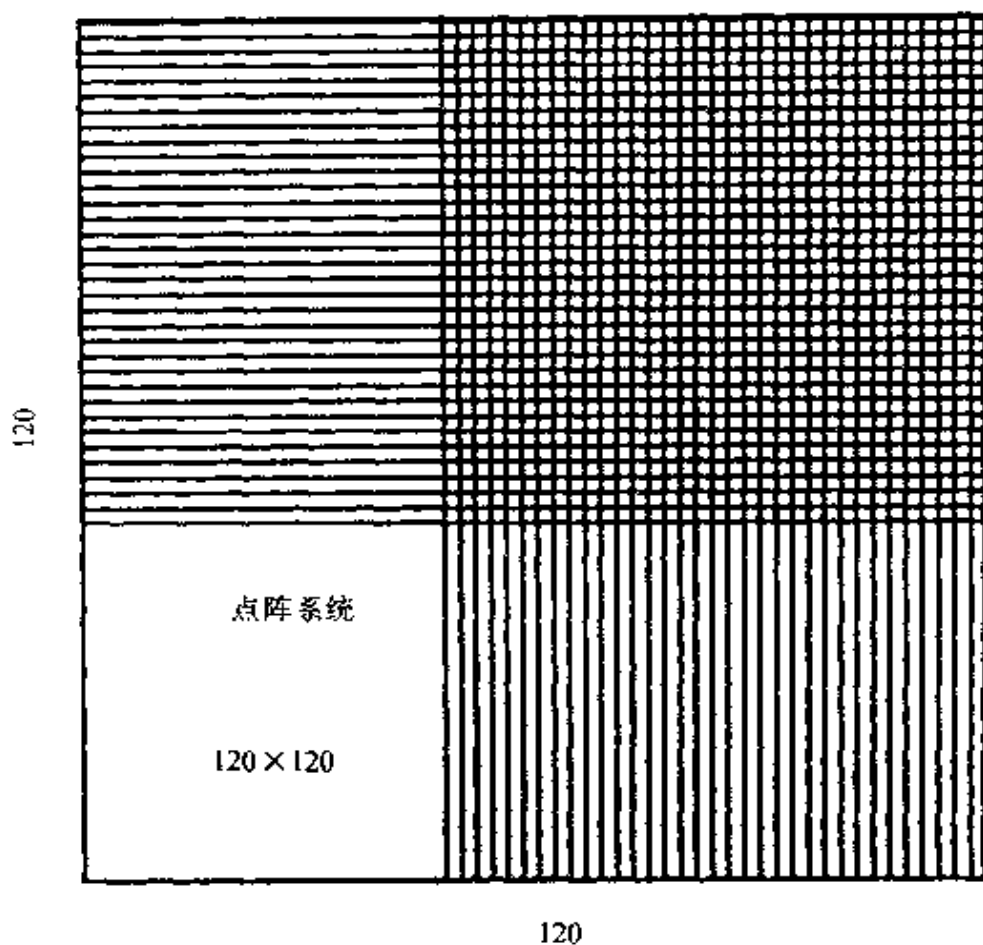


图 11.2 将 NK 模型置于 120×120 的点阵系统。每个点可以处于两种状态，1 或 0，并与东南西北 4 个点相邻。（整个点阵弯曲成一个环面，上边和下边相连，左边和右边相连，这样，每一个点都有 4 个相邻的点。）

方说，假定所有部分都处于状态 1。把每个部分的适应性作用相加，除以部分的个数。对于每种可能的结构，都如此这般算一下，就可以得到一个适应性地形。

麦克里迪、狄金森和我所研究的点阵比较大，因此我们的难题模型有 14400 个部分。这个难度够大的了。由于 NK 模型的复杂地形和许多其他充满冲突的优化难题非常相似，包括推销员路线问题，如果能找到解决此问题的办法，就有可能具有某种普遍意义。注意，这里同样面临着巨大的可能性空间。由于每个部分都能处于两种状态，1 或 0，所有部分的状态的组合，就是



2^{14400} 个。不要有不切实际的企图。把自大爆炸以来宇宙所经历的所有时间都搭进去，也不足以找到最佳答案。我们寻求的是优秀的结局，而不是完美。

由于比尔·麦克里迪是位物理学家，这种人总是喜欢将“能量”最小化，而不是将“适应性”最大化，另外也由于我们都习惯在成本的层面上寻求最小化，所以，我们就将这个 NK 模型，理解为能产生一个“能量”地形，并将能量最小化。这 14400 个部分，每一部分的构成，都是有 14400 个维度的布尔超立方体上的一个点。每个顶点都和另外的 14400 个点直接相关，每一个也都对应着另外 14400 个部分的状态，1 或 0。每个顶点都代表一个能量值，因此，这个 NK 模型就围绕这个巨大的布尔超立方体产生出一个能量地形。我们从中寻找一个突出的最小值。这里 NK 地形保持不变，我们寻找的时候，是自上而下，而不是自下而上。统计学意义上的地形，不论方向怎样，特点都是一样的。

这里我将介绍一下分片问题。假设我们使用的是同样的 NK 地形，任由各个部件一仍旧贯地配对耦合，但是将系统分割成互不重叠的不同规格的小片。总是依据同样的规则：把其中一部分的值改为对应值，比如 1 改成 0，0 改成 1。如果这么做会降低这一片的能量，就维持这一变化；不然的话就取消。

图 11.3 显示的是我们的 120×120 点阵的缩略形式，一个 10×10 的点阵。在图 11.3a 中，我们把整个点阵看成是一整片。只有当改变某部分的值，即将 1 改成 0，0 改成 1，对整体有益，能降低其能量时，才这么做。我们的所作所为，都必须符合整体的利益。

由于所有的行为都必须能降低整个点阵的能量，因此随着一个个部分被尝试、调整，整个系统就会相应地做出适应性调整，达到某种本地域内的能量最低点，然后就呆在那里，不再移动。一旦处于本地域内的能量最低点上，就无法再调整任何一部分的

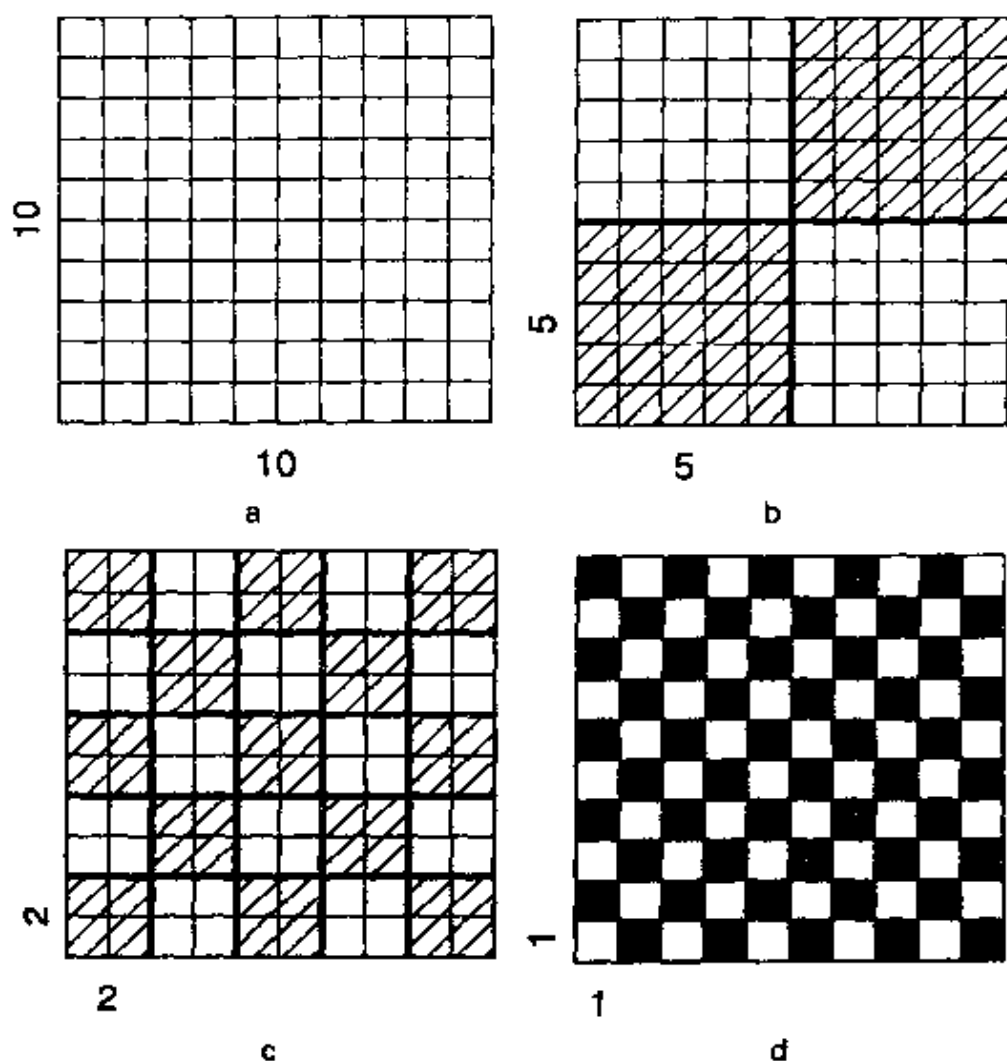


图 11.3 分片方式。a. 1 个 10×10 的 NK 点阵；整个系统是完整的一片。
b. 同样的点阵分割成 4 个 5×5 的小片。c. 25 个 2×2 的小片。d. 100 个 1×1 的小片。

值，无法为整体找到更低的能量值。所有的部分都被“冻结”，不再改变状态。简言之，整个系统被固定到一种解决方案上，并永远冻结在那里。

现在看一下图 11.3b。同样的点阵，各部分的配对关系相同，被分成 4 个小片，每个小片都是 5×5 的规格。每个部分仅属于惟一的一片。但是靠近片的边缘，则与邻近的片中的部分配对。因此适应性调整，对每部分的 1 或 0 的值进行变换，一片之中的变化，会影响到邻近的片。我要强调的是，这里各部分间的

配对关系，和图 11.3a 的配对关系是相同的。不过现在，按照规则，如果对相应的片有益，就可以调整某个部分的状态，这样，一个部分的变化就有可能为它所在的片带来利益，但是要损害邻近片的利益。

在图 11.3a 状态下，整个点阵只能向下移动，寻找能量的最低点。因此有人指出该系统是在一个势能面上移动。系统就像是在真正的山谷上的一个球。球会滚到山谷的最低点，呆在那里。不过，一旦点阵被分成小片，整个系统就不再是在一个势能面上移动。调整某片中某个部分的值，可能降低的是那一片的能量，而同时，由于一些片之间存在耦合配对关系，会提高相邻片的能量。这样，当某片发生改变，降低了自身能量，由于相邻的片的能量可能相应被提高，所以点阵的整体能量会升高。这样，整个系统就不是在一个势能面上进化。把整个系统分成小片，就像是在仿真退火中改变温度。一旦系统被分割成小片，某片的适应性调整，就可能对整个系统造成损害，那个调整，就会将整个系统引入歧途。

我们可以得出一个简单，但至关重要的结论：一旦整个问题被分割成小片，这些小片就是在共同进化。一个小片的适应性调整，会改变其他片的适应程度，改变适应性地形，或者说，会改变相邻片的“能量”和“能量地形”。

由于各片之间共同进化，与图 11.3a 整个系统只分成一大片相比，分片具有巨大的优势。如果处于图 11.3a 的整个点阵，如图 11.4 所示，陷入了一个不好的本地域内的最低点，因此该系统拥有很高的能量，而不是比较优越的低能量最低点，又该如何？这个只有一片的系统，就会永远陷在那个情况不妙的最低点上。可以这样考虑。当系统陷在那个糟糕的最低点上之后，如果我们把整个点阵分成 4 个 5×5 的小片，那么这个糟糕的最低点，除了是整个点阵能在本地域找到的最低点以外，还有几成机

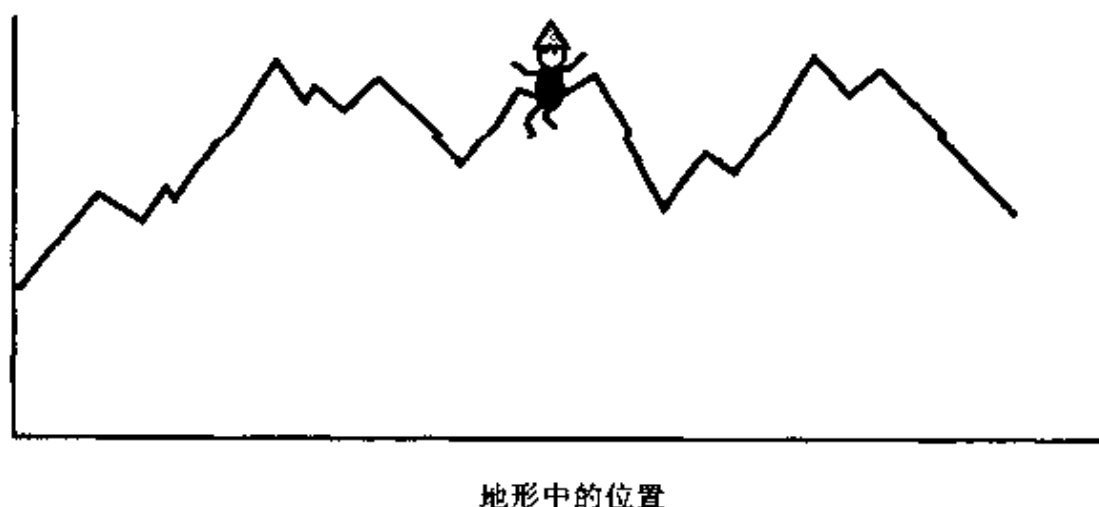


图 11.4 此能量地形图显示的是，一个系统陷入了本地域内的一个可怜的最小高能量点。

会是分割出的每个小片的本地域的最低点呢？由此可以看到，为了使分割成 4 个小块的系统还保留在原地那个糟糕的最低点，就必须保证系统的最低点，也必须是全部 4 个小片的最低点。如若不然，1 个或更多的小片就可以调整其状态，因此也就能够移动。一旦 1 个小片开始移动，整个点阵，就不再是冻结在糟糕的本地域最低点上。

凭直觉，我们可以得到很明确的答案。如果处于图 11.3a 下的整个点阵移动到一个糟糕的本地域最低点上，则此最低点同时也是所有 4 个 5×5 小片的最低点的可能性不大，因此分割后的系统不会冻结在原地。它将会溜走，在所有的可能性空间内搜寻最佳位置。

混沌的边缘

我们已经考察过遗传网络模型和共同进化过程中的有序和混沌的过渡阶段。在第十章里，我们注意到共同进化系统中最高平均适应程度，出现在红后混沌状态和 ESS 有序状态的过渡阶段



中。将大的系统分成小片，这些小片相互之间就可以共同进化。每个小片都向自身的适应性高峰，或者是能量最低点移动，但是它的行为，同时也会改变相邻小片的适应性地形或能量地形。在分片系统中，是否可以找到与混沌状态和有序状态类似的状态？会不会出现这两种状态间的转换过渡状态？最优解决方案，是不是出现在这一过渡阶段？我们即将看到，上述所有问题的答案，都是肯定的。

图 11.3a 状态，存在于有序状态之中。整个系统稳定在一个本地域内的最低点上。此后，任何一部分的状态，都不会在 1 和 0 之间变化。因此所有的部分都冻结在原地。但是，在另一个极端状态中，会发生什么样的事呢？在图 11.3d 所示的极端状态中，每一部分都形成一个小片。处于该极端状态的 10×10 点阵，就等于是一场有 100 个参加者的游戏。每一刻，每个参加者都要考虑它东南西北四个邻居的状态是 1 还是 0，并据此采取行动，选择 1 还是 0，来降低自身的能量。我们可以很容易猜想到，在此极端状态下，整个系统永无停歇，每一部分都不断从 1 变成 0，或从 0 变成 1。整个系统处于剧烈的混沌状态。

由于每个部分都永不停歇，不停改变状态，因此整个系统的能量非常高。在 NK 模型中，由 N 个部分组成的系统，随机选取的配置，在不进行任何优化之前，其能量值为 0.5（这是因为我们为适应性程度或能量随机赋的值是从 0.0 到 1.0，所以其平均值就是这两个值的中间值 0.5）。在混乱的极端状态下，点阵的平均能量值为 0.47。简言之，如果分片过多、过细，整个系统就会进入无序的混沌状态。每一部分都不断改变自身状态，点阵的平均能量很高。

这里我们就面临着最根本性的问题：分片是多大的时候，整个点阵的能量值能降到最低？

答案取决于点阵的能量地形究竟复杂到何种程度。我们的结



果表明，如果 K 值很低，即地形高度相关，非常平缓，则最优结果出现在图 11.3a 的状态下。对于简单问题，包含的互斥制约因素很少，使系统陷于停顿的本地域的最低点也就很少。但是随着地形变得越来越复杂，互斥制约因素就越来越严重，此时，最好是把整个系统分成一定数量的小片，使系统能够接近有序和混沌的过渡阶段。

在现有状况下，我们可以在保持点阵规格的基础上，检查互斥制约因素的增加量，但是考虑问题的时候，不仅要看每个点的东南西北 4 个紧挨着的点，还要加上另外的 4 个邻居，即东南、西南、东北、西北方向的 4 个点。图 11.5 表明，不断向交叉点

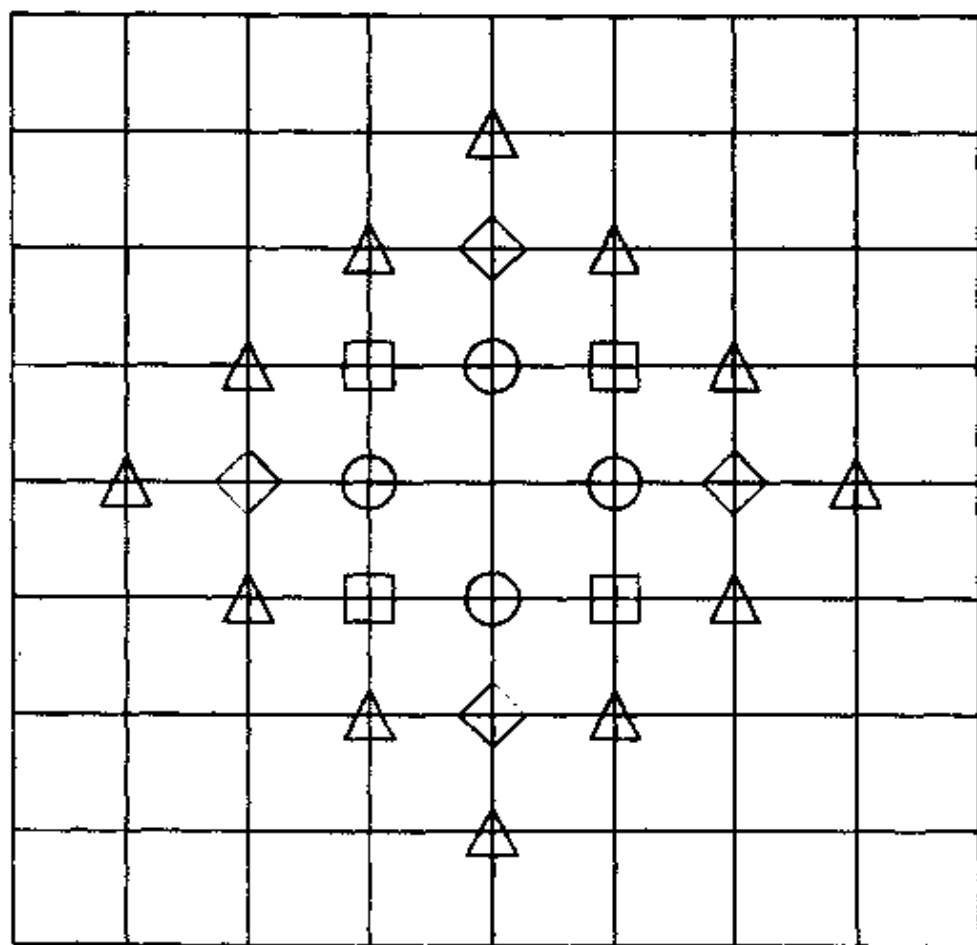
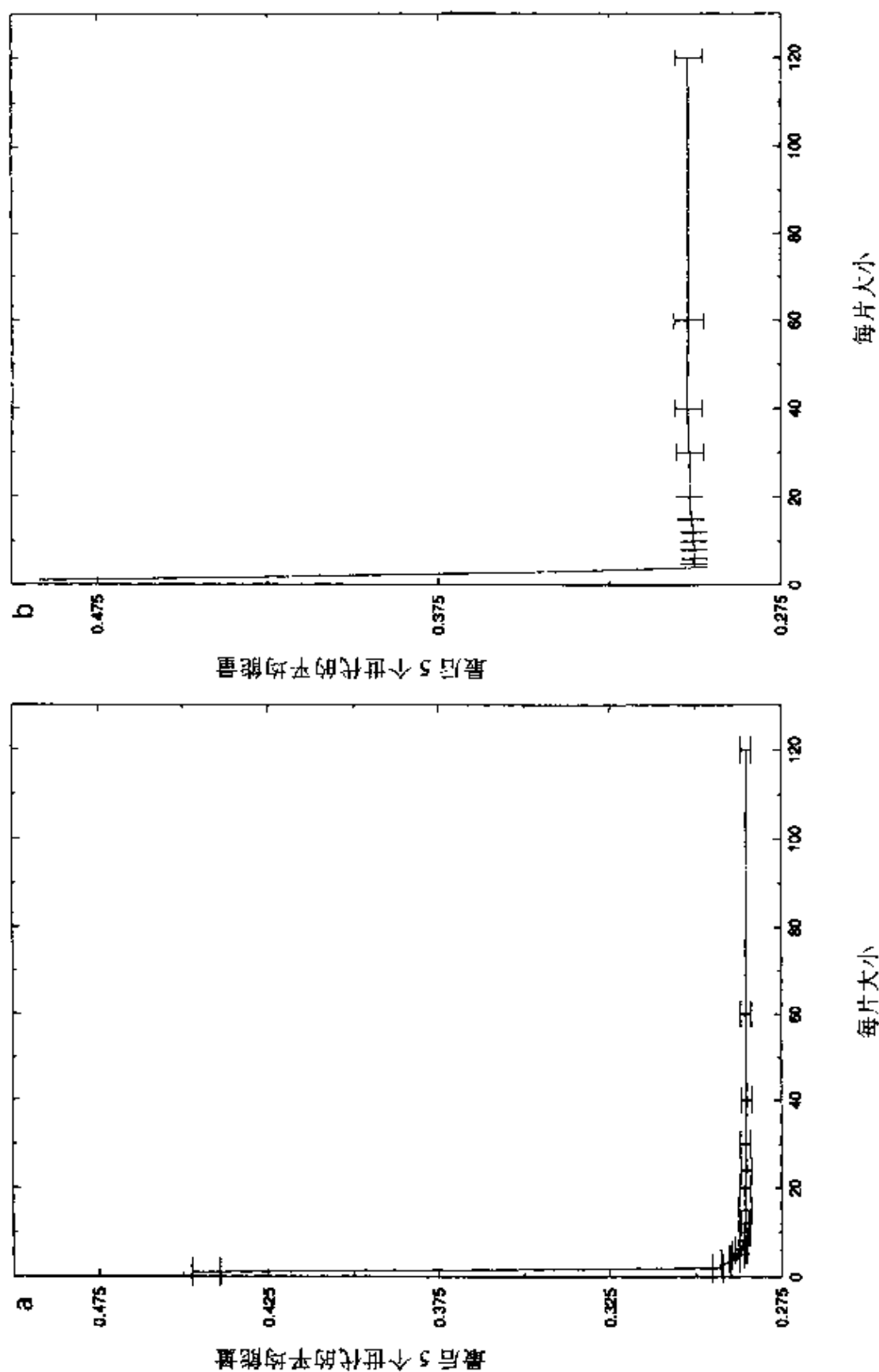


图 11.5 增大点阵的范围。在 NK 点阵中，1 个点可能有 4 个邻居（圆圈所示）；再向外扩，可以有 8 个（圆圈加方块）；更大扩展到 12 个（圆圈加方块加菱形）；甚至扩展到 $K=24$ 个（圆圈加方块加菱形再加三角形）。



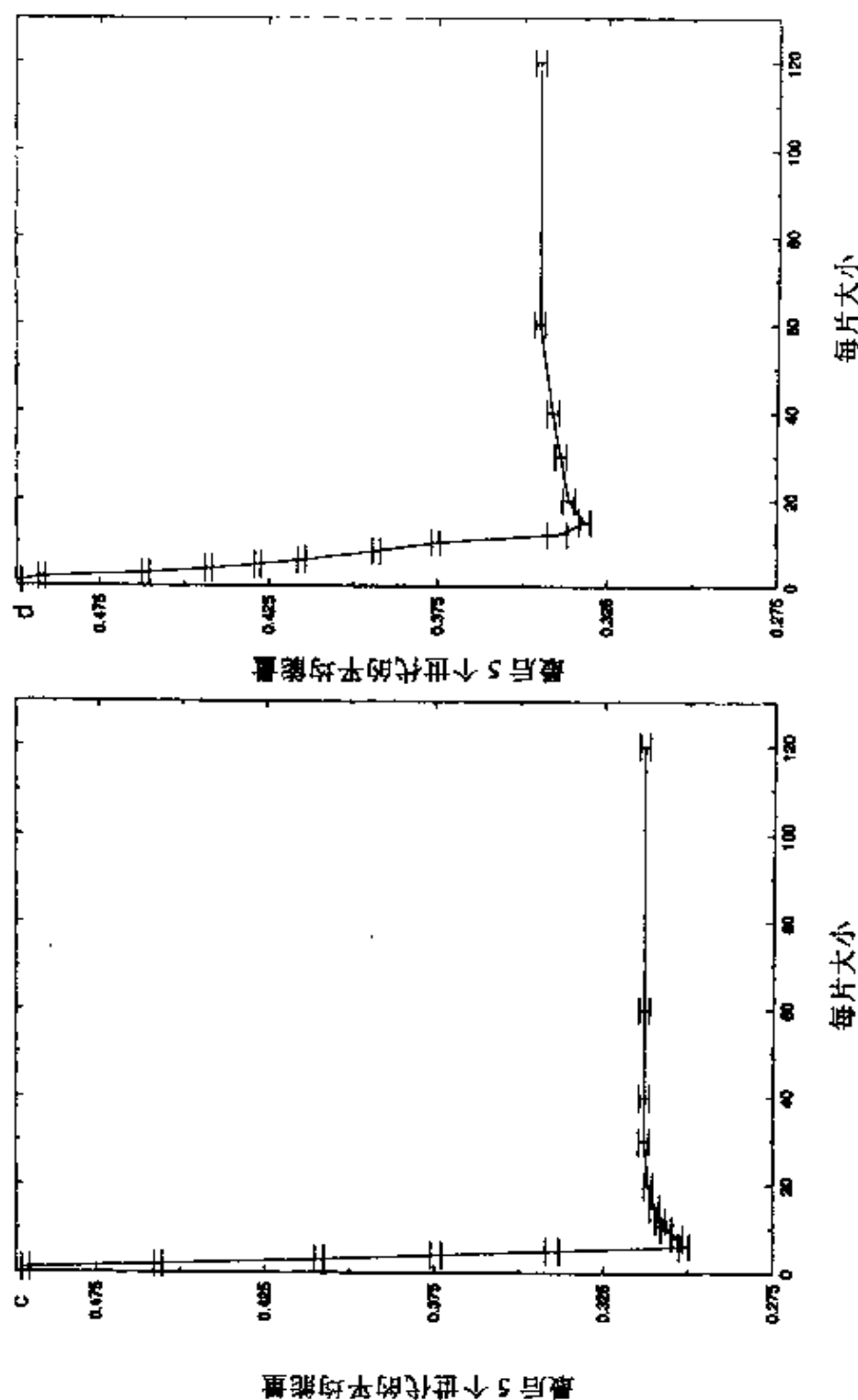


图 11.6 分片与控制。随着地形变得更加崎岖,把问题分片解决更容易找到最低能量点。 x 轴表示的是分片大小。仿真试验最后所获得的平均最低能量点标在 y 轴上。(分片大小曲线上下方的图块表明与标准的偏差为正负 1) a. 对于平坦的, $K=4$ 的地形,最佳分片大小,也就是最低能量,是每片大小为 120×120 。b. 对于比较崎岖的 $K=8$ 的地形,最佳分片大小是 4×4 。c. 当 $K=12$,最佳分片大小是 6×6 。d. $K=24$ 时,最佳分片大小是 15×15 。



的四周扩展，我们就可以想象，其相邻交叉点的数量，会有 4 个、8 个、12 个、24 个。在 NK 模型中， K 的值就从 4 增加到了 24。

图 11.6 显示的就是所得到的结果，任由分片后的点阵随时间而进化，只有在能够降低包含该格子的片的能量情况下，才调整随机选取的格子的状态。我们所进行的仿真实验，直到点阵的整体能量降到了固定值，或者是在一个很小的范围内摆动。图 11.6a~d 中，能量用 y 轴表示，而每片的大小用 x 轴表示。这里每个小片都是正方的，我们的结果是从大小为 120×120 的点阵得来。所有的仿真实验都用同一组 NK 点阵做的。所改变的只是分片的大小。这样，我们就可以从实验结果看出分片的大小和多少对降低整体能量所产生的效用。

结果很清楚。当 $K=4$ 时，最好是把整体看作一整片。即对于不太复杂的情况，地形比较平缓，图 11.3a 的效果比较好。但是随着地形越来越复杂，从 $K=8$ 到 $K=24$ ，很明显，只有当整个点阵被分成小片之后，才能使整体的能量降到最低。

这就是第一个主要的新结论。点阵是否需要分割成小片，每片都力图降低本身的能量，而不顾及对周围小片产生的影响，以此来获得最低能量，并不是显而易见的。但这个结论确实成立。如果面临的问题非常复杂，充满了互斥制约因素，把问题分割成多个小片，让各片自行优化，而所有的各片都共同进化，可能是比较好的办法。

此处又有一只无形的手在起作用。当系统被精心选择，分割成小片之后，每个小片都为了私利而进行调整，而总体来讲，其作用却有助于由多片组成的整个点阵获得最低的能量值。这里不需要中央机构来协调各片的行为，只要分片合理，即使每一个都为私利而行，最终其行为却能协调起来。

但是，究竟是什么决定了分片的大小是否合适？答案是：这



取决于混沌的边缘状态。分片过小，会导致混沌；分片过大，则容易自满，接受并不理想的方案而停止进化。如果存在适中的分片规格，那么，它往往是靠近有序和混沌状态间的转换过渡阶段。

在图 11.7 中，我要展示的就是这种“转换过渡阶段”。这两个数值都是有关同一个点阵的 NK 适应性地形的，初始值都一样。惟一的区别，是在图 11.7a 中， 120×120 的点阵被分成 5×5 个小片，而在图 11.7b 中，点阵被分成 6×6 个小片。这两个数值表明点阵中每个点调整的频率。调整频率高的点为黑色，不调整的是白色。在图 11.7a 中，大多数的点都是黑色的，而且在各片的边界之处最黑。在混沌状态中，各点不停地调整。然而只需将每片的大小调整为 6×6 ，结果就会变得非常惊人。正如图 11.7b 所示，几乎所有的点都停止了变动，只有在边界处的少数几个点还在变动，但几乎其他所有的点都安顿下来，不再变化。

就是这个系统，如果是按 5×5 分片，就永远不会找到解决方案，且整个点阵的能量会居高不下。同样是这个系统，如果是按 6×6 分片，就能够找到解决方案，几乎所有的分片和分片中的每一部分，都不再变化。另外整个点阵的能量也非常低。在 5×5 和 6×6 两者之间，出现了一种过渡阶段，经过此阶段，系统从混沌转向了有序状态。

对于共同进化的系统，似乎如果方阵按照 6×6 分片，每片都能达到各自的最低值，且此最低值和邻近分片的最低值相一致。这种情况就好似分片之间出现了纳什平衡，或进化稳定状态。每片所找到的最佳值，都和相邻各片的最佳值相一致。所有各片都不再变化。因此，各片就停止了在它们的适应性地形上共同进化。系统找到了整体解决方案。

许多次仿真实验似乎表明，对于某特定点阵，最低能量值出现在有序的 ESS 状态下，靠近状态转折阶段。在某些情况下，最

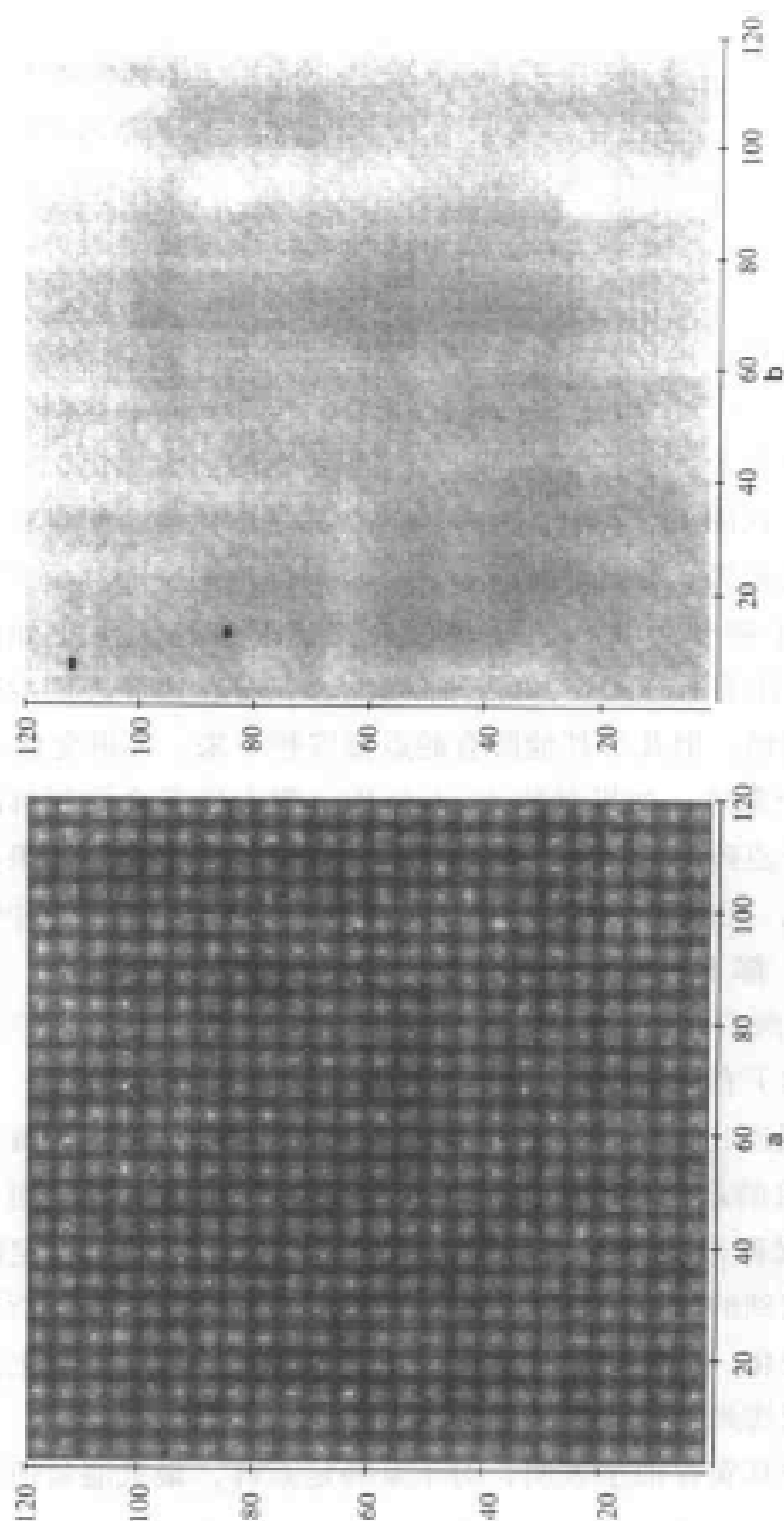


图 11.7 最佳分片大小出现在混沌边缘。对于 $K=12$ 的 NK 点阵来说，如果改变分片大小，会发生什么？(经常变换的点标为黑色，不变化的为白色。) a. 按 5×5 分片，点阵处于非冻结的混沌王国之中。在各片之间的边界地区，大多数点都是黑的。b. 请注意当我们把点阵按照 6×6 分片的话，几乎所有的点都停止变化，冻结起来。从 a 到 b 的转换就是从混沌到有序的状态转换。



低能量值出现在分片最小，且系统处于有序状态的情况下，亦即有序到混沌的过渡阶段之前。在另外一些情况下，最低能量值出现在分片比较大，系统深陷于有序状态，离有序到混沌的过渡阶段还比较远。因此，我们可以总结说，那只无形的手似乎是在有序状态下起作用，而不是靠近有序到混沌的过渡阶段。

分片可能性

有一些涉及许多可变因素和互斥制约因素的困难问题，如将整个问题分成不相重叠的小片来考虑，就可以找到很好的解决方案。这令我非常感兴趣。而且，我还惊奇地发现，这些制约因素之间的冲突越严重，分片方式就越有用。

虽然这些结论都是新的，尚需扩展，我还是觉得，分片方式会被证明为一种强有力的解决复杂难题的办法。事实上，我还觉得，在生态系统、经济体系和文化系统的适应性进化过程中，类似分片的解决问题方式，可能是一种最基本的机制。果真如此，分片逻辑可能预示着一种新的设计理念。另外，它也可能是全世界范围内管理复杂组织以及改进复杂机构等方面的一个新理念。

Homo sapiens，意思是“智人”，从旧石器时代到如今，经历了漫长的发展过程。目前，我们正构筑全球通讯网，正依据牛顿发现的第三定律，向外层空间发射设计精巧的小盒子。挑战者号航天飞机的悲剧，供电故障，哈勃望远镜遇到的麻烦，大规模电脑网络瘫痪的威胁，所有这些设计上的奇迹，触及了我们所不了解的复杂性科学的边沿。随着 2000 年的来临，我们在设计制造复杂工具的时候，越来越受到几乎难以解决的互斥制约因素的困扰。比如，据说有人试图改进复杂的人造物品的设计，比如超音速交通工具。一个小组负责机翼的设计，另一个负责座椅，另一个负责空气动力学，但是所有这些方面的解决方案，汇集到一



起，却不能相互融合，满足所有设计要求。不断有新的方案出现，使局面变得更混乱。最后，一个小组做出决定，比如，确定下空气动力系统，或是机翼结构，结果其他的设计就都因为这一决定的制约而无法实现。

这种普遍存在的不融洽现象所反映的问题，是不是设计目标被分割过细，结果存在过多的小片，使得整个的设计过程处于不相融洽的混沌状态，就像将前面所说的 120×120 的点阵，分成 5×5 的小片，而不是 6×6 ？如果我们不知道增加分片的大小，可以使问题从混沌转向有序，从而得出很好的解决方案，我们就会试图这么做。似乎有必要在解决实际问题时，多试验几种方案。

了解最佳分片原理，可能有助于解决其他领域内的复杂组织问题。例如，在制造业中，很久以来，都是由一系列固定设备及其相互联系的生产流程，生产出最终产品。比如生产汽车的流水线就是一例。这种固定设备是为长期生产而购置的。现在，向柔性制造转型变得越来越重要，其含义，就是要拥有多样的最终产品，要能够以较低的投资迅速更新生产设备，这样，就能够从事短线产品的生产，以少量的、有特殊针对性的产品，适应不同的市场地形。但是我们还必须检验产品的质量 and 稳定性。这一点如何做到呢？难道每个独立的生产步骤都要检查？还是只检查整个系统的产出？或者是在某个中间阶段进行检验？我一直在考虑，应该有种比较好的方式，把每种产品的生产流程分割为小片，每一小片包含一定数量的生产步骤，对每个分片进行优化，允许这些分片共同进化，这样它们就可以使整个生产迅速达到最优。

将系统进行分片，使之处于混沌边缘，可能特别有效，这主要是基于两个差异很大的原因：这种系统不仅可以迅速找到协调的解决方案，更根本的原因，是这种系统能够在处于变化中的适应性地形上跟踪不断移动的最高峰。处于混沌边缘的系统处于



“近乎融合”的状态。假设整个地形由于外部状况的改变而变迁。这样，本地域内的高峰的位置就会改变。处于有序状态深处的比较固定的系统，会倾向于坚守在业已达到的峰顶。而平衡的系统，则能够更灵活地寻找变动不居的高峰。

彼得·班克斯(Peter Banks)建议我们重新审视如何管理复杂组织。他说，我们需要一种讲得通的非集中化理论。如果我们现已发现，有证据表明把复杂问题分割成大小适当的小部分，可以迅速找到有效的妥协方案，而不去将这种发现发展成为可行的管理技能，那就未免太迂腐了。

然而如果我们着手将“分片方式”发展成为可行的管理技能，不论是应用于商业还是更广阔的范围，那就必须直面一个事实，即面对需要解决的问题，我们几乎总是做出错误的判断。这样，我们就会错误地理解问题，最终却把找到的解决错误问题的方案应用到现实生活中。

判断上的错误经常发生。物理学家和生物学家在试图弄清楚复杂生物聚合体，如蛋白质等是如何将氨基酸的线性排列变成简洁的三维结构的时候，通过建立模型来帮助理解这种结构如何达到最低能量。结果却发现，实际上蛋白质的结构和他们所预计的并不一样。物理学家和生物学家都把蛋白质的表面估计错了。他们想象到的地形是错误的，因此解决的问题也是错误的。这并非由于他们都是傻瓜，而是我们不知道需要解决的到底是什么问题。

因此，错误判断也是局部的。假设我们来考虑一些生产设备，它们的原料和产品相互联系。比如，石化行业中用来加工石油，将小分子变成各种各样产品的复杂化工设备。面对各种互斥制约因素和目标，我们希望对生产进行优化。然而，对于一连串化学反应的频率，和它们对温度、压力和催化剂纯度的要求等细节，我们都缺乏了解。由于不知道这些，我们所造的各种型号的



设备都几乎不可避免地存在判断错误。我们可能为生产过程网络建立计算机模型，用不同的方式分解问题，最终发现了能使系统进入有序状态的分解方法。这时我们会急不可耐地要把计算机模型提供的“优化方案”应用到实际的生产设备上。我敢打赌，计算机模型提供的有关如何优化各个部分和整体性能的方案，不会成功。因为我们极有可能一开始建造的模型就是错误的，我们的答案所解决的是理解有误的问题。

我们必须能从不断发生的判断错误中吸取教训。假设我们为生产设备建立模型，并从模型了解到一种特殊的分解方法是最优的，可以使整个系统达到期望的解决方式。如果我们对问题的判断有误，那么详细的解决方案可能没有多少价值。但是，分解问题的最佳途径本身，可能跟理解问题的正误关系不大。在我们研究过的 NK 点阵和分片模型中，NK 地形能量的轻微变化，会从根本上改变最小值的分布，但是却可能不会影响到问题的分解方式，如点阵可能最好还是按 6×6 分割。因此，更聪明的做法是借鉴问题的最佳分片方式，将其应用到实际的生产设备上，并分别优化每个部分，而不是把通过模型针对错误问题所获得的方案直接应用到实际设备上。简而言之，了解如何优化判断有误的问题，也许无法为我们提供解决实际问题的方案，但却有可能教给我们如何去理解实际问题，如何将其分解成共同进化的部分，并找到很好的方案。

基于接受者的优化，有时无视某些“客户”的反映

拉里·伍德 (Larry Wood) 是 GTE 公司^①一位热心而优秀的年轻科学家，他经常凭借自己的奇思妙想赢得各种奖项。1993 年

① GTE 公司是美国第三大本地电话公司。——译者注



春天，伍德来到圣塔菲研究院，对分片理论非常感兴趣。他建议说：“你们应该考虑一下基于接受者的通讯（receiver-based communication）。我愿意提供帮助。”

基于接受者的通讯大体是这么回事：一个系统中所有的成员在协调行为之时都让其他成员知道正在发生的事情。信息的接受者借此决定它们该采取什么行动。接受者根据整体的“团队”目标而做出决定。这将有可能实现协调动作。伍德解释说，美国空军就借鉴了这一策略，使飞行员能在缺乏地面指挥的情况下协调行动。飞行员相互通话，并优先对最近的同伴做出回应，因此达到战斗群体协调行动，这和鸟类结群飞行的方式有相似之处。

我们现在开始研究一个基于接受者的通讯的简单模式，当然还是要利用我们钟爱的 NK 模型。初步的结果非常诱人。

我们再次把 NK 模型的各点放在 120×120 的正方点阵中。想象其中的每一点都是一个“供应者”，对自己和 $K=4$ 个“客户”起作用，分别位于它的东南西北 4 个方向。每一时刻，每个客户都向自己的各个供应者提供信息，告诉它们如果该供应者将提供的东西从 0 改成 1，或从 1 改成 0，会发生什么。而每个客户则全看它的供应者根据所接收的通讯信息做出的“明智”决定。

因此，每个点都是一个孤立成员，各自面临关系到自身利益和它的 4 个客户的优化问题。这就是一个简单的基于接受者的通讯模型，其中，信息提供者面临来自客户的异常复杂，充满冲突的问题。停一下，看直觉能告诉我们什么。使用分片方式，靠近一个分片边缘的点有机会做出状态调整，调整的目的是为了自身的利益，而不会顾及邻近分片的利益。这个点会忽略一部分“客户”。这使得整个系统有可能“出错”，堕入不好的附近区域内的最低点。但是只有靠近边界的点能够对分片的状态进行调整，因为位于大片的中心的点，无法影响其他分片内的客户。



如果在我们的基于接受者的通讯的模型中，允许其中的点忽略某些客户，那么这个结果也许有用。假设每个点都从私利出发，关心自身和另外一部分的客户（设该比例为 P ），忽略其他客户（比例为 $1 - P$ ）。如果我们调整 P 的值，会发生什么？

图 11.8 显示了我们所获得的结果。当一小部分客户被忽略的时候，整个点阵的能量达到了最低！如图 11.8 所示，如果每个点都努力帮助自己和所有的客户，此时系统的性能，比不上每个点都关注平均大约 95% 的客户时的性能。在实际的数值仿真计算中，我们提供一个可能性，让每个点都考虑所有的客户，并关注其中的 95%。在另一个极端，每个点一个客户也不关心，整个点阵的能量非常高，因此是不好的结果。

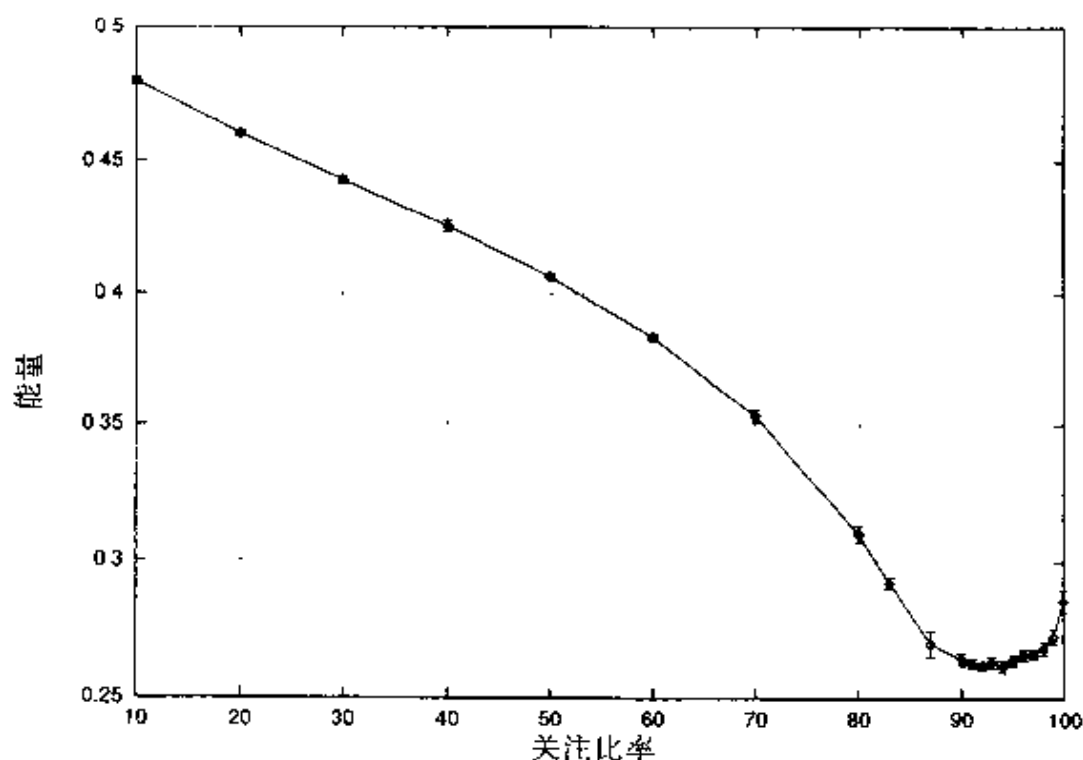


图 11.8 你不可能令所有的人满意。当每个供应者关注的只是一部分客户时，系统能量最低。当任意时刻供应者关注 93% 到 95% 的客户，而忽略另外的 5% 到 7% 的时候，可以达到最低能量。

这里我们发现一些有趣的现象。对于充满冲突的难题，如果在不同时刻，有选择地忽略一部分约束，可能获得最好的解决方



案。这就好像是说，你不应该力图使所有的人永远都对你满意，但是在某些特定时刻，却要关注所有人。听上去很有些耳熟吧。说的很像是现实生活。

虽然在我们的实验中，仿真退火方式比分片方式的效果更好，但是前者对于我们更深入地了解个体和组织是如何解决难题的助益不大。人类组织确实是分成部门、利益中心和其他的非集中化的部门。另外，基于接受者的优化方式的效果似乎和仿真退火方式一样好。人并不有意出错，而且出错率不断降低，但是人的确有时会由于无知或其他原因忽略某些约束因素，由于这个原因，我猜测分片和基于接受者的优化方式，确实是我们在解决复杂的充满冲突的任务时进行合作所采取的一部分方式。

分片政治

对于政治，分片方式和基于接受者的优化方式是否也能提供什么参考？强烈的直觉告诉我们，它们之间可能存在密切的关系。有时候，民主制度被简单地当作是“多数人的统治”。可是，民主政治是一种更为复杂的政治过程。美国宪法和权利法案创造了联邦体制，这个整体被分作多个部分，称作州。州本身也是由更小的部分组成的，如县、自治市等。各自的权限经常重叠。个人权利，即最小部分的权力受到保护。

各个州的政体表现出各种各样的愿望、要求和利益的冲突。我们是否可以将民主政治视作能够在这些相互冲突的利益间获得最佳妥协的一种制度？这一观点基本上道出了事实。我们所不清楚的，是目前这个看上去明显的充满机会主义、断层、争议、政治拨款、钱权交易、欺诈、贿选的混乱系统，是否因为它为了解决充满冲突因素的难题而演化出来的系统，而且它还可能有好的表现，达成一般说来相当不错的妥协。



阿奎那(Aquinas)^①试图找到一套自洽的道德规范。康德^②在其光彩夺目的座右铭中也有同样的追求。依义而行，使自己的原则成为普遍的规范。因此，以诚待人是比较合理的，因为如果所有的成员都这么做，那么诚实就能成为一致的行为。但是如果人们都撒谎，撒谎也就没有意义了。只有在某个系统内的大多数成员都诚实的情况下，撒谎才有效果。

阿奎那和康德做出了巨大的努力。不管怎样，这种对一致的期望在现实中遇到了困难。谁也无法保证，我们认为“好”的目标，相互之间是一致的；也无法保证，在所有时代它们都是恒定不变的。我们必须生活在这个充满冲突的世界中，并创造着它。因此，我们的政治体制必须不断进化，以求达到好的妥协。分片方式和基于接受者的优化方式的外面，罩着一个圈，那是现实和自然合理性的光环。

另外，分片方式和基于接受者的优化方式有可能为我们提供理解民主政治机制的新的理论工具。我不是搞政治学的，因而就此问题我请教了罗伯特·阿克塞尔罗德(Robert Axelrod)，他曾获麦克阿瑟奖，为探讨“囚犯难题”做出了杰出的贡献，揭示出何时会出现合作。最近，阿克塞尔罗德一直在研究出现高级别政治角色的简单模型。他的新模型，是根据有些州，胁迫邻近的州，要求它们进贡，然后和这些进贡的州为了共同的利益合作组成联盟。这些联盟就是新出现的政治角色。

① 托马斯·阿奎那(Thomas Aquinas, 1225 ~ 1274 年)，意大利人，中世纪最有名的神学家和经院哲学家。他成功地将基督教的神学思想和亚里士多德的哲学融合在一起，建立起了庞大的经院哲学体系。一生著有 18 部巨著，其中包括集基督教思想之大成的《神学大全》和《哲学大全》、《论存在和本质》、《论正统信仰和真理、异教徒议论大全》等。——译者注

② 康德(Immanuel Kant, 1724 年 4 月 22 日 ~ 1804 年 2 月 12 日)启蒙运动最重要的思想家，历史上最伟大的哲学家之一。由笛卡儿开创的理性主义和由培根开创的经验主义新思潮，在他身上得到集中体现。——译者注



我向阿克塞尔罗德请教分片方式和民主政治的问题，他说由半自治性地区结合而组成的联邦体制可以看作是一种允许“试验”的机制，这样，各地就能找到一些新的解决方式，供其他地区复制借鉴。俄勒冈进行了改革，其他的州可以效仿。这些试探行为似乎是合理的，而且的确会发生。但是分片方式和基于接受者的优化方式还提出了更多问题：民主体制能够在相互冲突的约束因素之间找到非常好的妥协。图 11.3a 的系统往往断然选择不好的妥协方案，并僵化不变。而对于不切实际耽于空想的图 11.3d 系统，则极少能选择好解决方案安顿下来。其极端，就是每个公民都组成自己的政治行动委员会。无法达成任何妥协。

正如在第一章所提到的，詹姆斯·米尔（James Mill）有一次从他认为确定无疑的第一原则，推导出像他那个时期的英国那样的君主立宪政体，很明显是政府的最高形式。一个人在对他所熟悉的事物的优越性进行推理分析的时候，往往会出问题。我们将此称为米尔式错误。我们都会出这种问题。

不过我估计，了解分片方式和基于接受者的优化方式，有助于我们找到使复杂系统达到非常好的妥协的途径，这样估计应该不至于出太大的问题。我们可能是蹒跚着，站在了新的基础上探讨民主政治，全世界越来越多的地方试验不同的政治形式，这是完全自然的。如果是这样，民主政治的进化过程，当属那种可理解的现象之列。我们，生在这个宇宙中，共同创造，并再创造着它的每一个部分。



第十二章 方兴的全球文明

大雨倾盆而下。我和布莱恩·戈德温 (Brian Goodwin) 一起到建在山坡上的一幢低矮的水泥建筑下面躲雨，从这里可以俯瞰卢加诺湖 (Lago di Lugano)，这座城市位于意大利北部，靠近瑞士边境。我们发现，原来我们是置身于一座一次大战时修建的地堡里，透过机关枪眼，看着雨水打在湖面上。我们似乎可以看到，海明威的小说《永别了，武器》中的主人公正设法穿过这片湖水，前往三千米外瑞士那边的涯岸。两天前，我曾沿着同样的路线，和我的两个孩子，伊坦和梅里特，驾着租来的小船，荡舟湖上，回来时还给他们买了热巧克力补充体力。布莱恩当时到我的岳母克劳迪娅家来探望我们，那是在庞托切雷西奥 (Ponto Ceresio)，就在湖边上。他和我打算考虑一下自催化系统和功能组织的意义。布莱恩·戈德温是我的密友，多年前在蒙特利尔，他曾获罗氏奖学金，是一位杰出的理论生物学家。第一次遇到他，是1967年，在华伦·马卡洛 (Warren McCulloch) 的位于麻省理工学院的电子实验室。华伦是控制论的创始人之一。几年之后，布莱恩、我、我的妻子伊丽莎白，有幸被邀请与华伦和他的妻子鲁克共度了几个月的时光。后来布莱恩造访马卡洛时，他正在研究建立第一个大型基因网络的数学模型，在该模型中，基因相互作用，决定了细胞间的区别。至今我还能记起，当时在圣弗兰西斯



科的一家书店里，翻到戈德温的《细胞的临时组织》那本书时，心中所怀的敬畏之情，那时我正跌跌撞撞，试图建立我的第一个布尔数学网络模型。每个搞科学的人在年轻时，不定什么时候，都会遇到类似的情景：“噢，老天，早已经有人做过此类研究了！”不过，那个人所做的往往并非你要做的，因此你的整个生命，虽然面临梦想破灭的深渊，还是能找到一条狭小的道路，通往高山上的牧场。布莱恩所做的，和我准备做的，虽然主旨相似，内容却并不完全一样。多年来，我们交往深厚。我深深佩服他对于生物学中未知领域问题的洞见。

大雨后来变成了冰雹，看着这一情景，布莱恩说：“自催化系统，肯定是功能整合的自然模型。他们是功能整体。”我自然同意他的说法。几年前，有两位智利科学家，一位是哈姆伯图·马图拉纳（Humberto Maturana），跟马卡洛是同事，关系很好，另一位是弗朗西斯科·巴雷拉（Francisco Varela），他们共同创立了自创作的概念。自创作系统有能力自发产生。这一概念的历史，要早于马图拉纳和巴雷拉地发现，后来我在印度遇到了马图拉纳，和巴雷拉也成了好朋友。在18世纪晚期，德国哲学家康德曾想到过生物体是自创作整体，其中的每一部分，既是为整体而存在，又是依靠整体而存在。戈德温和同事杰瑞·维伯斯特（Gerry Webster）清楚地阐明了这一衍生自康德的思想，使其成为当代生物学的一部分。他们指出，生物体是自创作整体的概念，已经被生物体是“中心控制体”的说法所替代。19世纪末期，著名生物学家奥古斯特·魏斯曼（August Weismann）创立了一种观点，认为生物体是由特殊的细胞种系的生长和发展而创造出的，种系含有微观分子结构，是中心控制体，控制着生长和发展。这样一来，魏斯曼的分子结构，就变成了染色体，变成了遗传代码，变成了控制个体发生的“发展程序”。应该说，这一思想一直从魏斯曼延续到现在。沿着这一轨迹，我们丢弃了把细胞和生

物体看作是白创造整体的早期看法。揭示生物现象的压力，全部落在了DNA的“遗传指令”上。DNA是主宰生命的一种分子，而DNA本身，也是由自然选择造就的。这一观点离生物体是突发奇想而产生的作品，是敲敲打打凑合起来的结构这一观点，只有一步之遥。遗传代码可以被编制成任意程序，因此依靠自然选择，也就能敲敲打打做出任意的小玩艺儿。

然而，如我们在第三章所看到的，一旦在某个地方有那么一锅充满化学物质的浓汤，汤的浓度和分子多样性达到一定程度，生命就有可能由于自催化的过渡阶段而产生。我们至少在电子计算机的仿真实验中可以看到，一些自催化分子的集合可以自我复制，分成两个具有遗传能力的变体，接着，依据达尔文的理论，就能开始进化。但是在自催化物质集合中，不存在中心控制体。没有单独的基因组，没有DNA。有的只是康德可能惊喜地预见到的分子自创作系统的集合。各部分既是为整体而存在，又依靠整体而存在。整体既是为部分而存在，又依靠部分而存在。虽然在实验室里的广口杯中，我们尚未成功地合成这种自催化物质，不过它并不神秘。它还不是真正的生物体。然而一旦我们能够通过实验在试管中获得，或是在海底的火山口附近，找到能够进化甚至共同进化的自催化物质，我们应该感到，所见到的是一种有生命的系统。

认为生命起源于集体的自我催化，我不知道这是否正确，但这种系统有可能存在这一事实，应该能够使我们怀疑那种认为存在中心控制体的理论教条。对于生命，中心控制体是不需要的。我认为，生命具有一种不可分割的统一性，且一直如此。

因此当我和布莱恩蹲伏在地堡里，对生命的起源和不断发生的战争、死亡感慨不已的时候，我们已经有了一个庞大的计划。我们可以看到自催化分子集合，如RNA或者肽等，清楚地表明，它们存在功能上的完整性，这一点毫不神秘。一组分子，可



能具有催化闭合性，也可能没有。催化闭合性是指系统中的每个分子要么是由外界提供的“食物”，要么是靠自催化系统内部不同分子的相互作用而合成。催化闭合性并不神秘。但并非每个分子都有此特性，它是分子组成的系统的特性，是一种自然属性。

如果我们拥有自催化物质，就可以看到，这种系统可以形成具有竞争关系或互助关系的生态系统。你斜眼看我，可能会压抑我，也可能激起我的某种反应。如果我们相互帮助，就有可能从交易中获取利益。通过进化，我们可以产生更接近的耦合、共生现象或者是具有高度秩序的整体。我们可以建立一种分子“经济”。无疑，生态学和经济学在共同进化的自催化物质层面，具有共性。我和布莱恩预计，假以时日，这种相互作用、共同进化的自催化系统组成的生态，就可以探索不断扩展的分子可能性空间，以某种我们尚不了解的方式，创造一种生物圈，并扩展分子的多样性。一股由不同分子构成的波浪，涌遍全球。

尔后，在技术创新和文化领域，也会出现类似的情形，就像一个正在出现的地球文明。我们，这群能人的后代，当年我们的祖先，曾在噼啪作响的篝火旁，思索自身的起源和归宿。可能是某个深夜，在卢加诺的湖岸上，可能当时正大雨倾盆。

雨停了。我们爬出了地堡，向山下克劳迪娅的房子走去，希望她已经煮好了粥，炖好了蘑菇，做得了蔬菜通心粉。我们感到自己的想法很有前途。但是我们也知道自己被卡在了那里。对于如何从一个相互作用的蛋白质或 RNA 分子，发展成为一个理论框架，毫无头绪。实际上，我们从那时起，等了 6 年，直到华尔特·芳坦娜（Walter Fontana），创造了更为广阔的理论原型的基础。

炼金术

华尔特·芳坦娜是维也纳一位年轻的理论化学家。他与彼得



·舒斯特 (Peter Schuster) 合写的论文, 讨论了 RNA 分子如何合成产生复杂结构及该结构的进化如何产生。芳坦娜和舒斯特, 曼弗雷德·艾根 (Manfred Eigen), 我以及其他的人一样, 当时都开始考虑分子的适应性地形结构。

不过芳坦娜的野心更大。他去哥廷根拜访艾根的研究小组, 和约翰·梅卡斯基 (John McCaskill) 谈得很投缘, 后者是一位很有才华的年轻物理学者, 致力于 RNA 分子的理论研究和实验。梅卡斯基的野心也不小。

图灵机是一种通用的计算设备, 可以输入处理用二进制代码表示的数据。根据输入的程序, 图灵机可以处理用磁带输入的数据, 并以特定的方式写回到磁带上。假设输入一串数值, 用图灵机来求这些数的平均数。通过改变磁带上的 1 和 0, 计算机就可以输出合适的数字。由于图灵机和程序二者本身能够使用一串二进制数来表达, 从本质上讲, 计算就是一串数据, 对另一串数据进行操作。因此, 图灵机对磁带数据的操作, 和生物酶对基质的作用就有些类似, 后者起作用的时候, 就是将某些原子取出, 再加入一些原子。

梅卡斯基想, 如果把一堆图灵机放到一锅汤里, 让它们在里面相互碰撞, 会有什么样的事情发生? 发生碰撞时, 一方会作为机器起作用, 另外一方会作为数据磁带。这么一锅程序的汤, 会自我作用, 相互重写对方的程序, 直到……直到发生什么事情呢?

事实上, 不会发生这样的事情。许多图灵机程序会进入无限循环, 无休无止。在这种情况下, 碰撞的双方会相互缠绕, 永不停歇, 无法产生任何程序“产品”。这一试图创造自我复制的计算机程序大杂烩的努力失败了。唉。

圣塔菲研究院的院墙上挂着一幅卡通画。画的是一个头发乱蓬蓬, 满脸疑惑的小孩, 往烧杯里倒一种液体, 满桌子搞得乱七



八糟，一屋子的鸡毛。图画配文如下：

“上帝童年时，初试造小鸡”。也许在宇宙大爆炸之前，那位总设计师也试着造过别样的宇宙。

芳坦娜来到了圣塔菲研究院，满脑子 RNA 地形的概念，但是和大多数有创造力的科学家一样，他找到了追寻自己的野心的途径。既然图灵机在相互操作的时候会死机，他就试着研究一种类似的数学模型—— λ 算法。许多读者知道 λ 算法的一种衍生物，即 Lisp 计算机语言。在 Lisp 语言中或者 λ 算法中，函数是用一串符号来表示的，它具有这么一种特性，即如果该函数试图对另一串符号进行操作，那么这种操作总是合法的，不会引起系统死锁。也就是说，如果一个函数对另一函数进行操作，几乎总是可以产生另外一个函数。

更简单地说，函数就是符号串。符号串对符号串进行操作，创造出新的符号串。 λ 算法和 Lisp 语言概括了化学的特点，一串原子——称作分子——对另一串原子进行操作，产生新的一串原子。酶作用于基质，制造出产品。

由于芳坦娜是一个理论化学家， λ 算法和 Lisp 语言执行的是某种运算法则，而且芳坦娜想用这些算法搞出一锅化学汤，他把自己的发明叫做计算化学，或者是魔法（炼金术）。

我认为，芳坦娜的魔法化学，有可能是一种真正的魔法，一种开始改变我们所了解的生物学世界、经济学世界和文化世界的魔法。不是吗，我们可以用符号串代表相互作用的化学物质，或者代表某些商品或服务，甚至代表文化观念的传播——生物学家理查德·道金斯（Richard Dawkins）将其称作“迷母斯”（memes）。稍后，我会介绍我搞的一个技术进化模型，其中符号串代表某个经济体系中的商品和服务，比如锤头、钉子、生产线、椅子、钻、电脑等等。这些符号串相互作用，产生新的符号串，会形成一个共同进化的技术网络模型，里面每一种商品或服务



务，都是靠其他的商品或服务所创造的小生境而生存。在更广的意义上，符号串模型可以为我们提供一种全新而有效的方式，去思考文化的进化和全球文明的产生。我们的思想、观念、人物角色、迷母斯等，相互作用，永无休止，就像分子的潮水在超临界生物圈中涌动。华尔特创造的数学语言，可以用于探索这些相互作用，相互改变，它是符号串所熬成的一锅汤，用于探索里面所发生的创造及死亡现象的含义。

芳坦娜把他的魔法引入电脑，产生了什么？他得到了自催化物质！他造出了“人造生命”。

华尔特在他早期的数值实验中是这么做的。他在电脑中做了个“恒化器”，里面有固定数量的符号串。这些符号串像化学元素一样相互碰撞。在两个符号串中，一个会被随机选作程序，另一个作为数据。符号串程序作用于符号串数据，产生新的符号串。如果全部符号串的数量超过了一个最大值，如 10000，芳坦娜就随机剔除一两个，使整体数量保持在 10000。通过随机剔除某些符号串，他就对经常出现的符号串施加了选择的压力。与之对应，不常出现的符号串，会从恒化器里消失。

起初，系统是一锅随机选取的符号串，它们相互作用，产生出千变万化、见所未见的符号串。然而，一段时间之后，我们就能渐渐发现，有的符号串以前见过。经过一段时间，芳坦娜发现，他的这锅汤变成了可以自我维持的由符号串组成的生态系统，或称作自催化系统。

有谁会想到，这么一个自我维持的由符号串组成的生态系统，可以出自一组相互碰撞，相互改写的 Lisp 表达式？由一组随机组合的 Lisp 表达式，一个自维持生态系统自己组织起来了。从无到有。芳坦娜发现了什么？

他发现了两种类型的自我复制。第一种，某些 Lisp 表达式演化成为通用的拷贝程序。它可以拷贝自身，或是拷贝其他任何表



达式。这种高度适应的符号串迅速地自我复制，一些依附者接管了这锅汤。芳坦娜实际上是创造出了一个由 RNA 构成类似 RNA polymerase 的东西，也就是一种核酶 (ribozyme) RNA polymerase。这种 RNA 能够拷贝任何 RNA 分子，包括自身。别忘了，哈佛医学院的杰克·佐斯塔克正是想得到这么一种核酶 RNA polymerase。这种东西可以看作是一种有生命的分子。

然而芳坦娜还发现了另一种自我复制形式。如果他对通用拷贝程序加以限制，使其无法大量产生并接管整锅汤，他发现得到的正是我希望的：由 Lisp 表达式组成的自催化物质。也就是说，他发现，他的这锅汤，经过演化，里面有了 Lisp 代码组成的“代谢内核”，每个都是由汤中的一个或多个 Lisp 表达式发生作用时形成的。

就像蛋白质分子中的 RNA 自催化物质一样，华尔特发现的 Lisp 表达式构成的自催化物质是功能整体的例证。这种整体性和功能性毫不神秘。在两种情况下，都出现了“催化闭合”。整体因各部分的作用而存在；然而由于它具有整体性的催化闭合，整体同时也是各部分能保持存在的条件。想来，康德若在天有灵，了解到这些也该感到欣慰。呈现在我们面前的，纯粹是自然产生的组织，毫无神秘之处。

芳坦娜将拷贝程序称作“零级组织”，将自催化程序称作“一级组织”。他目前正和耶鲁大学的生物学家雷奥·布斯 (Leo Buss) 合作，希望发展出更深入的理论来解释功能性组织，和关于组织等级结构的清晰的概念。例如，芳坦娜和布斯开始怀疑，当两个一级组织相互作用，交换符号串时会发生什么。他们发现在两个组织之间，会产生一种“胶”，这种胶可以帮助两个一级组织，或其中的一个，保持其状态。两者自然而然地会产生互助行为。在共同进化的一级自催化系统之间，不言而喻可以产生贸易和经济优势。



技术共同进化

汽车出现了，马车就退出了。随马而去的，有铁匠、马具店、马厩、轻便马车以及西方社会里的驿马快信制度。当汽车流行开来，石油工业、遍布城乡的加油站和公路，自然而然就得到了发展。路铺好以后，人们开始开车四处闯荡，因此汽车旅馆就应运而生。之后，又出现了速度限制、交通信号灯、交通警察、交通法庭以及违章停车被开罚单之后悄悄行贿的行为，等等等等，继续进入我们的经济生活和行为方式。

经济学家约瑟夫·舒彼得曾就创造性破坏浪潮和企业家扮演的角色做过一番论述。然而上面的话，并不是受人尊敬的舒彼得所说，而是我的朋友，爱尔兰经济学家布莱恩·亚瑟在圣塔菲研究院的一家名叫“贝比”的饭店，埋头大吃海鲜的时候所说的一席话。这个人总是选择贝比餐厅的海鲜色拉，简直就是公然挑战任何理性思维，因为他说，这里的海鲜色拉，味道实在糟糕透顶。每次来吃，他都大声抱怨：“太差了，这饭馆太差了。”我就问：“那你为啥还总是点海鲜色拉？”他缄口不言。这是7年之中，我惟一能问倒他的时刻。布莱恩对“受限合理性（bounded rationality）”问题产生了极大的兴趣。标准的经济学理论都假定经济因素是具备无限理性的，而实际并非如此，所有的经济学家都知道这种假定是错误的，这是为什么？我怀疑布莱恩对这个问题感兴趣，是因为他实际上没有能力尝一尝贝比饭店的汉堡包，虽然这东西他们做得不错。真是个好饭馆。

我曾问他：“你们搞经济学的人，是如何看待技术进化问题的？”从布莱恩和其他经济学家那里，我逐渐找到答案。他们给的答案很好，且非常一致。西德尼·温特和迪克·纳尔逊（Dick Nelson）所开创的工作，现在许多人在继续研究，其目的，就是



探讨投资带来创新的问题和企业需要对创新研究进行投资，还是仅仅去模仿其他企业。某个企业靠数百万的投资获得创新，就可以像我们在第九章中讨论的那样，沿着技术发展轨迹的学习曲线向上攀登。其他企业或许也会投资进行创新，或者仅仅模仿抄袭改进的产品。IBM 对技术革新进行投资，创造了个人电脑；康柏公司只是克隆了 IBM 的产品进行销售。这些有关技术进化的理论都牵涉到学习曲线问题，技术进步和生产增长率与投资的关系问题以及如何在创新和模仿其他竞争企业两者之间优化资源配置问题。

当然，我本人不是搞经济学的，虽然现在我非常喜欢倾听来圣塔菲研究院的经济学界人士的谈话。但是，我总是禁不住地想，这些经济学家尚未触及布莱恩·亚瑟第一次震撼过我的东西。目前经济学所做的研究，忽视了技术进化实际上是共同进化这么一个事实。汽车的出现使钉马掌的铁匠铺消失了，创造了汽车旅馆市场。你赖以谋生的小地形，是由我和其他人共同创造的。电脑系统工程师所修理的东西，50 年前尚不存在。靠出售电脑硬件维持的电脑商店，在 50 年前不可能存在。

几乎我们所有人现在赖以谋生的手段，对于蹲坐在篝火旁的能人，对于旧石器时代晚期在法国南部比勒高省（Pénigord）的拉斯科岩洞（Lascaux）^①绘制岩画的克罗马努人，都是不可能的。古时候，人们每天靠捕猎和采集野果为食。而现在，理论经济学家在白板上——都不用黑板了——写下抽象的等式，而竟有人付钱给他们！我得说，靠这就能挣口饭吃，真是滑稽。

① 拉斯科岩洞（Lascaux, Grotte de）位于法国多尔多涅地区蒙蒂尼亚克镇附近韦泽尔河谷的一个洞穴，其中的史前艺术品是迄今已发现的最杰出的作品之一。这个洞穴是 1940 年由四个男孩子因寻找一条狗而发现的。洞穴有一个宏大的主洞和几条险峻的通道，布满极其优美的动物雕像、素描及彩绘。根据壁画风格、所绘动物种类以及碳-14 断代测定数据，确定拉斯科洞穴壁画属于奥瑞纳文化期晚期。——译者注



(最近我去了法国的比勒高省，从莱埃济 (Les Eyzies) 的枫德戈姆^① (Font-de-Gaume) 山洞附近的一位手艺人手里买了一块用旧石器时代的技术加工制作的火镰。这位手艺人四十五六岁年纪，右手由于长期挥动锤头，磨出了半英寸厚的茧子，而他的所谓锤头，是一根麋鹿的腿骨，他可能是过去的 6 万年以来做火镰最多的人。然而，即使是他，也是靠一种新的小生境而过活——加工制造火镰，卖给对我们的祖先，克鲁玛努人的生活充满敬佩的旅游者。)

我们生活在一种经济的网中。现代社会经济中的许多商品和服务都是“中间商品和服务”，这些商品和服务，是要被先用来制造其他的商品和服务，才被最终消费者使用。某种中间商品的原料，比如汽车发动机，可能有不同来源，从机床制造，到铁矿开采，到计算机辅助设计发动机，到计算机制造商，到开发计算机设计程序的软件工程师。我们生活在一个巨大的经济生态圈中，我们相互贸易，交换产品。这里面存在大量的经济小生境。

但是这些小生境是如何产生的？到底是什么，控制着经济之网的结构和安排，使得就业、任务、功能、产品能相互衔接，组成了这张产品和消费的大网？

而且若经济网络真的存在，它肯定要比旧石器时代克罗马努人绘制岩画的时候的经济网络复杂得多，肯定比杰里科人垒起城墙的时候的经济网络复杂得多，也比新墨西哥的阿那萨齐人 1000 年前创造出查克恩 (Chacoan) 文化的时候的经济网络复杂得多。如果经济网络越来越错综复杂，那么掌管这个网络结构的是什么？而且我对下面这个问题非常着迷：如果经济是一张大网——实际上确实如此，是否是这个网本身的结构，决定并推动网

^①法国著名的旧石器时代晚期绘画洞窟。位于多尔多涅地区埃泽镇附近的布恩河谷。1901 年发现。——译者注



的变化？果真如此，我们就需要寻找一种理论，解释经济网络的自我转化，经过一段时间之后，可以创造出变动不止的生产技术网络。新技术的出现（如汽车），会促使别的一些技术消亡（比如马、轻便马车和马具生产），同时创造出适于更新的技术生存的小生境（公路、汽车旅馆，交通灯等）。

这种变动不已的经济体系，听起来有点像变动不已的生物圈，在后者当中，三叶虫曾统治了很长很长一段时期，后来被节肢动物取代，之后又有别的物种。寒武纪生物大爆炸自上而下产生了许多物种，和技术发展轨迹早期非常类似：一种创新出现之后，会出现许多变异形式，直到后来人们选择了少数几种主导设计样式，其他的趋于消亡，这是不是说明，物种的这种永无休止的进化和共同进化的全景，反映在技术共同进化中？也许比 DNA 和变速箱更深层的规律，决定了生物和技术的进化，这些规律，是关于复杂物体如何通过寻找的过程而构造的，是关于自催化物质创造小生境，导致创新并反过来改进它所创造的小生境的。如果存在这种普遍适用的规律，不应该太出乎我们的意料。生物进化及共同进化，和技术进化及共同进化是非常类似的过程，都和小生境的创造以及组合优化有关。虽然决定生物和技术进化的细节很明显存在区别，它们的任务和最终的宏观特点可能极为相似。

但是我们该如何考虑某个共同进化的经济网络的结构呢？经济学家知道，这种结构是存在的。这并不神秘。看见汽车满街跑，认为应该有加油站，并不需要任何经济金融方面的天分。人们需要做的，是跑去找个有交情的银行家，搞个市场调研，借几千块钱，开一家加油站。

经济学家所面临的困难，是无法找到明显的途径，建立一种理论，将他们叫做“互补因素”的东西放进来做全盘考虑。汽车和汽油是消费互补因素。想出门，既需要汽车，也需要汽油。当你向饭店招待说“火腿鸡蛋，双面煎”，你的意思是想要鸡蛋里



带火腿。这两者是互补因素。要是你提着榔头想把两块板子钉到一起，你会顺路捎上几颗钉子，榔头和钉子就是互补品。钉板子的时候，两者缺一不可。如果你想去店里做个搁物架，手里拿着螺丝刀，再顺路捎上几颗钉子可就有点蠢。我们都知道，螺丝刀和螺丝是一对互补品。而钉子和螺丝，经济学家管他们叫做替代品。一般我们拿螺丝代替钉子，或拿钉子代替螺丝。

经济网络正是由这些互补产品和替代产品所构成。正是这些组合，创造了经济网络中的小生境，然而经济学家却没有明显可以利用的途径，为此建立某种理论。要是搞一套理论，说榔头和钉子是一对，汽车和汽油是一对，这算啥意思？要是有一套理论讨论一个经济网络中的商品和服务的功能性联系，这又算啥意思？我们似乎需要对所有可能的配对工具，比如汽车雨刮、保险条款、捆绑贷款的个人所有部分、激光眼科手术，都要搞出一套理论来。如果我们知道控制商品和服务之间究竟是互补还是替代关系的“规则”，就可以根据新商品预见到会出现什么样的小生境。我们就能够建立一种理论，解释技术网络是如何通过不断创造新的小生境促进自身的转化。

这里有一种新的思路。如果我们把商品和服务看作是符号串，可以当做“工具”、“原材料”、“产品”使用，会如何呢？符号串作用于符号串产生新的符号串。榔头作用于钉子和两块板子，做成钉在一起的板子。一个蛋白酶作用于两个有机分子做成两个结合在一起的分子。一个符号串，从 Lisp 语言的角度来考虑，既是“工具”，又是“原材料”，可以作用于自身，也可以作用于其他工具，制造出“产品”。因此，Lisp 的化学规则就可以明确地定义什么是互补产品，什么是替代产品。“酶”和“原材料”型的符号串被用来制造产品，它们是互补的。如果你能找到另一种符号串“酶”，作用于“原材料”符号串，制造出同样的产品，那么这两种酶就是替代关系。如果你能找到另一种



“原材料”符号串，当受到原来的酶符号串的作用，制造出同样的产品，那么这两种原材料就是替代关系。如果某个过程制造出的产品，进入了另一个制造循环，我们就得到了由 Lisp 运算逻辑定义的互补和替代生产功能形成的网络模型。这个模型是功能互配的相互作用、相互制造的组织。简单说来，就是我们得到了一个其结构促使自身转化的经济网络的初期模型。

技术网络扩展是由于新商品为未来更新的商品创造了生存地形。我们的符号串模型因此也就变成了生存地形创造的模型。临界化学系统的分子爆炸，寒武纪生物大爆炸，我们如今所面临的人造物品种类大爆炸——所有这一切都促进多样性、复杂性不断增加，这种努力，由于每个过程都会为更新的组织创造出适宜生存的地形而得到加强。分子、生物、经济活动、文化形式，这些东西的多样性和复杂性不断提高，要求我们去了解控制生存地形的自催化性创造的最根本的规律。

如果我们无法找到经济中互补物和替代物的真正规律，为什么榔头和钉子是一对，汽车和汽油是一对，那么，建立这些抽象的模型又有什么用处呢？我认为，其作用在于，如果模型中体现出的规律，存在于同样的总类中，我们就可以借此预计在实际生活中会出现什么情形。“总类”是物理学家搞出的名词，指的是表现出同样强烈行为特征的一类模型。因此，这里讨论的行为特征，不是由模型的细节所决定的。这样一来，多个与现实世界有出入的模型，仍然可能成功地揭示现实世界的情形，只要现实世界和我们的模型属于同样的总类。

随机语法

大约与阿龙佐·彻基（Alonzo Church）发明 λ 算法和艾伦·图灵（Alan Turing）发明图灵机同时，另一位逻辑学家艾米尔·



波斯特 (Emil Post) 开发了另一套同样可以进行通用运算的系统。所有这些系统功能相当。波斯特的系统对于寻找经济模型的总类很有用处。

在图 12.1 中, 线段的左右两边有成对的符号串。例如, 第一对左边是(111), 右边是(00101), 第二对左边是(0010), 右边是(110)。这些符号串表明, 它们之间存在某种“语法”。每一对符号串, 都列出了一个“替代物”。不论左边的符号串在哪里出现, 我们都要用右边的符号串来代替。在图 12.2 中, 可以看到在小锅中有一些符号串, 而图 12.1 所示的语法可以应用在这些符号串上。最简单的解释是, 你可以按照下面的方法应用图 12.1 所示的语法。从锅里随机选取一个符号串, 再从图 12.2 中

语法表	
1 1 1	0 0 1 0 1
0 0 1 0	1 1 0
0 0	1 0 1 1
1 0 0 1	0 1
1 0 1	0 0 1 0

图 12.1 波斯特(Post)语法。需用右边的符号串代替左边的符号串。

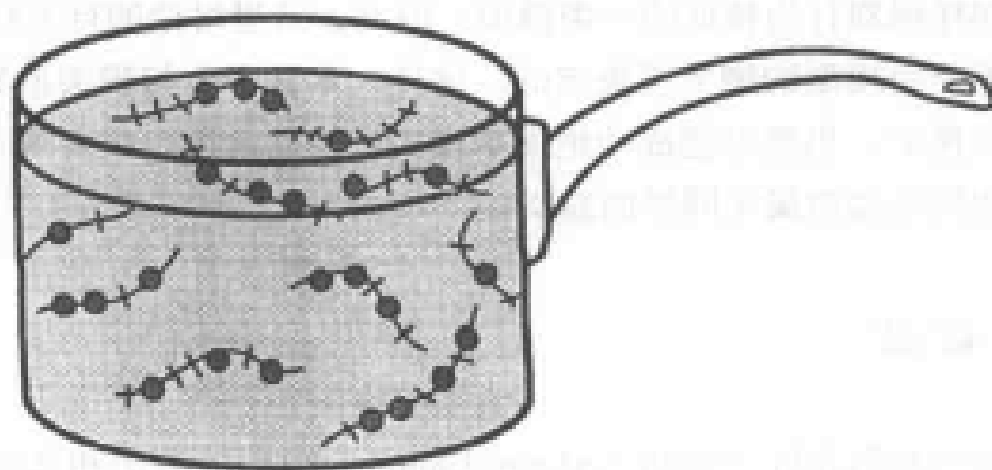


图 12.2 将波斯特语法应用到一锅符号串上, 会出现一系列新的符号串。



随机选取一对符号串，现在设法将所选的一对符号串中左边的那个和从锅中选取的符号串相匹配。这样，如果你从图中选择了一对符号串，而又发现从锅里随机选取的符号串为(111)，你就需要将其去掉，用图 12.1 中对应的符号串代替。

显然，你可以无限制地将图 12.1 所示的语法反复应用到锅里的符号串上。你可以不断从锅里随机选择符号串，根据图 12.1，用对应的符号串代替。你可能会注意到，将图 12.1 所示的对应规则应用到图 12.2 上，可以在符号串里创造出新的“点”，而且可以将创造出它的规则应用到这一新的点上。为了避免无限循环，你可能需要规定，在尚有未被应用的规则之前，每一点仅能应用一次图 12.1 所示的规则。

任何关于如何应用图 12.1 的规则以及应用规则的顺序等类似的规定，都会产生一种算法，或说程序。从一组初始符号串开始，你会一直应用替代规则，制造出新的符号串。就像图灵机把输入的磁带数据转换为输出的磁带数据一样，你也是在做某种形式的计算。

下一步，就是请各位退出这些活动，允许锅里的符号串相互作用，就像酶作用于基质，去执行图 12.1 所示的“替代规则”。完成此步骤的一个简单方法，是确定“酶点”。例如，图 12.1 中第一行表明，(111)应该替换成(00101)。假设在图 12.2 所示的锅里，有一个包含(111)的符号串，(111)就是一种“基质”。能对它起作用的酶，可能就是在同一锅里，含有(000)这个“模板匹配”点的符号串。这里的“酶配型规则”是酶当中的 0，对应基质里的 1，就像核苷配对一样。因此，只要有一套“酶点”规则，我们就可以让锅里的符号串相互作用。其中一种可能的作用，是两个随机选择的符号串发生碰撞。如果其中的一个含有“酶点”，与另一个所含的“基质点”相配，则酶点就可以依据图 12.1 所示的对应规则对基质点发生作用。



大致的情形就是如此。现在我们就有了由特殊的“语法”所规定的计算化学。锅里的符号串相互转换，变成新的符号串，它们重又相互作用，循环不止。这种无休无止的相互作用，会使符号串越来越多样化，繁盛起来。经过一段时间后，符号串会进入全盛，我们正是对此感兴趣，因为符号串繁荣的形式将会成为我们技术共同进化的模型。为了达到这个目的，还需要加上一些新的想法。

不过首先，我们如何选择所需的语法，就像图 12.1 所示的那种规则呢？谁都不知道，究竟什么是确定选择符号串配对关系，即“替代规则”的“正确方法”。更糟糕的是，可能存在的选择是无限的。原则上，符号串可能会有无数对。另外，也没有人限制我们说，起“酶”的作用的必须是单个的符号串，“基质”也必须是单个的符号串，所产生的，还必须是单个的符号串。我们完全可以把一组有序的符号串看作是原料，而把另外一组符号串看作是机器。把原料放入机器，就会得到一堆产品。所谓的机器也可能是一条生产线，对输入的符号串进行一系列加工。

如果我们允许出现上述情况，而且原料和机器可以是任意符号串的组合，那么根据数学定理，可能存在的语法规则的量就不仅仅是无限大，而是二阶无限大。也就是说，语法规则的数量，就跟实数一样，是无穷多的。

由于无法统计可能的语法数量，就作个弊，玩点猫腻吧。我们暂时先从无穷多的语法中随机取样，看看在“语法空间”的不同区域内，存在什么样的语法。我们设想在这一锅符号串内，最终导致的行为与细节的关系不明显，在此语法空间内，我们可以找到一些区域。简言之，我们寻找的是总类。

确定语法空间内不同区域内的语法类别，或者语法集合的一个办法，是通过语法中可以产生的成对符号串的数量、符号串长



度的分配以及成对符号串中左右两边的符号串的长短分布规律来获得。例如，如果所有右边的符号串都小于左边的，通过替代，最终就会获得非常短的符号串，短得不足以跟任何“酶点”匹配。这锅汤就成了惰性的。另外，所允许的“原料”、“机器”和“产品”的复杂程度，可以用它们包含的符号串的数量来确定。系统地改变所有这些语法参数，就可以探索语法空间的不同区域。估计不同的区域会呈现不同的行为特征。这些不同的区域和不同的行为特征应该就是期望得到的总类。

迄今尚无人进行这一系统研究。如果能够找到“语法空间”的一个区域，为我们提供与实际的技术共同进化非常相似的模型，那也许就意味着我们找到了正确的总类和正确的模型，这一模型蕴含了技术上的替代物和互补物的规律性的东西。这是一项研究计划。

这一研究计划业已开始，我和同事们一起，已经建立了几个小型经济模型，它们正在产生有趣的结果。

蛋、喷射器和蘑菇

讨论经济模型之前，我们先考虑一下，在那个充满符号串的锅里，当符号串按照我们可能选择的替代规则相互作用时，究竟会发生什么。一个充满可能性的新世界的出现，可能为我们了解技术以及其他形式的进化提供线索。记住，我们可以将符号串看作是分子模型，也可以看作是某个经济体系模型中的商品和服务，甚至可以看作是文化模型中的文化迷母斯，如时尚、角色、观点等。另外还要记住，语法模型首次为我们提供了一些正式理论的某种通用的“数学”方法，用来研究当某个“实体”，既可以是被操作并改变的对象，也可以是发出这种动作的主体，为其他同类实体创造小生境。因此，语法模型帮助我们明确那些直觉



上能理解，但是无法精确描述的东西的规律。

如果一个符号串既可以复制自身，也可以复制其他任何符号串，我们将其看作是“复制酶”。

或者，我们会得到一组具备自催化功能的符号串。它们可以从自身复制出另外一组符号串。在《秩序的起源》一书中，我用了某天深夜想到的名字来称呼它们。这么一种闭合的自我创造的符号串，是符号串空间内悬在那里的一种“蛋”。假设有一组永远不变的“基础”符号串。它可能创造出新的符号串，然后这些符号串相互作用，通过一种“喷射器”，创造出更新的符号串——甚至是更长的符号串。喷射器会向外喷射出可能成立的符号串。

喷射器可能是有限的，也可能是无限的。如是无限的，基础符号串可以喷射出一股花样不断增加的符号串。

而“蛋”，则可能有裂缝，漏出“喷射器”。这么一种“蛋”，悬在那里，看上去就像是某种怪模怪样的太空船，向符号串空间黑暗的深处，喷射出一股符号串。

一个耐久的基础符号串创造出的喷射器，喷出的符号串具有“回馈”作用，能以另外的方式创造出早先曾出现过的符号串。那天深夜，我将这戏称为“蘑菇”。蘑菇是“自举”功能的一种模型。通过某种方式创造出的符号串，后来可以通过另一种方式，由另一个符号串创造出来，而这“另一个符号串”，也是得力于第一个符号串才出现的。不断改进石锤和挖掘工具，后来导致采矿业和冶金业的出现，又引出了机器工具，这些机器工具又返回来制造能够制造机器的金属工具。此乃“自举”。想想看，自旧石器时代晚期以来，“蘑菇”事例在技术进化史中是不是比比皆是。我们制造的工具，帮助我们制造出新的工具，反过来新工具又为我们制造最初的工具提供了新的手段和方式。这一系统具有自催化功能。建立在持久的基础物质上，获取外源食物和能



量的生物及其新陈代谢系统，就是一种蘑菇，我们的技术社会即是一例。生态系统及经济系统的蘑菇网络，其内在是一致的统一体。这些实体及其功能角色碰到一起，即可系统地耦合起来。

具备耐久力的基础符号串可能产生无穷的符号串，但是，可能有某种类型的符号串，永远无法自这一基础符号串产生。例如，可能就是造不出以(110101...)开头的符号串。虽然符号串的数量是无穷的，但数值组合并非无穷多。更糟的是，即使有了最初的符号串和语法，我们也无法从形式上证明，或者证伪，某一符号串，如(1101010001010)一定能够产生。在计算理论中，这叫做“形式不可判定性”，科特·哥德尔(Kurt Gödel)的著名的“不完备定理”谈到了它。

很快我将谈到，我们其实就生活在这样一个世界中。形式不可判定性意味着，原则上讲，我们无法预见将来。例如，对于所处的世界，我们无法预见，说(11010100001010)永远无法形成。万一(11010100001010)所指的是世界末日的一场大战呢？这是永远无法说清的。

如果我们创造的技术、经济和文化世界，和我们所想像的符号世界真的很相似，又当如何呢？毕竟，符号世界是根据化学规则建立的。如果发现化学规则就是一种形式语法，不可判定性的惊人含义就是：假设有一组持久的基础化学物质，也许，从形式上讲，我们无法断定，某种化学物质是否可以由这一组基础物质合成产生。简言之，化学的基本规则虽然不完全为我们所知，但并不神秘。但是假如化学规则可以用形式语法的形式记录下来，那么就应该存在既不可能证实，也不可能证伪的关于化学反应系统进化的论断，哥德尔定理也有力地支持这一观点。

如果实际的化学原理可以推导出形式不可判定性，那么，技术和文化的进化，岂不是也能够导出同样的不可判定性？我们或许能够用某种形式语法表述技术互补性和替代性的规则，或许不



能。如果能，那么，根据哥德尔定理，就应该存在形式上无法判定的关于这种世界如何演化的论断。如果不能，如果没有任何规则控制转换的发生，那么我们当然也无法预见。

技术共同进化和经济起飞

我猜测这些由符号串构成的玩具世界可能揭示了技术进化一个新特点，也许这有助于技术共同进化理论的建立：临界和超临界行为特点。技术不断多样化的持久爆炸性增长，其前提可能是商品和服务要有必需的多样性。标准的宏观经济增长模型是单部门模型——生产消费的都是同一种产品。经济增长是通过生产和消费的产品的增长量测算的。这么一种理论忽视了商品和服务品种的增长在经济增长中所起的作用。如果商品和服务品种的增长确实如一些事实所证明的那样，与经济增长是相关的，那么，品种增长本身也可能和经济起飞有关。

图 12.3 显示的是法国的轮廓。这里，我们再次使用符号串来作为商品和服务的模型。我们将赠给法国人一些原材料，而我们要考虑的，是当他们意识到这些原料的潜在价值时，“技术前沿”会如何进化。我们可以这样想象，每一年，都有一定种类的符号串从法国肥沃的土地上长出来。这些符号串就是法国的“可再生资源”，它们代表的可能是葡萄、小麦、煤炭、牛奶、钢铁、木材、羊毛，等等。让我们忘掉每种商品和服务的价值以及谁生产了这些东西，还有随之产生的价格等等。我们只来考虑一下展现在法国面前的不断演化的“技术可能性”，而不理会是否真的有人需要这些商品或服务，这在技术上大约是可行的。

在第一阶段，法国人可能消耗掉所有的可更新资源。或者，他们会参考每个市镇、乡村的旅馆里刻着的“技术互补规则”，考虑一下利用现有的可更新资源，使之相互作用，创造出的所有



图 12.3 法国的轮廓，图中显示不同的地方出产的物品。这些符号串代表的是法国所拥有的“可更新资源”，如木材、煤炭、羊毛、牛奶、钢铁、小麦等等。人们一旦开始利用这些符号串，作用于其他符号串，就会产生更为复杂的产品。

可能的新商品和服务。钢铁可以造刀、叉、勺或是斧头。牛奶可以做冰激凌。小麦和牛奶可以做麦片粥。这样在下一阶段，法国人就可以消费他们的可更新资源并创造出的第一批丰富产品，或者是考虑还能生产什么。也许可以把冰激凌和葡萄混合起来，或者是把冰激凌和葡萄混合起来后再放到烤好的麦子面里，做成第一块法式蛋糕。也许斧头可以用来砍柴。也许木材和斧头可以用来造桥。

大家可以从看出端倪了。在每一阶段，先前“发明”的商



品和服务可以创造出新的机会，制造更多的商品和服务。技术的边疆在扩展，它不断建设自身，它不断展现在人们面前。我们的简单语法模型可供我们讨论这种演变。

经济学家喜欢考虑更为复杂的模型，至少要包括消费者以及他们对潜在的商品和服务的需求。设想每个符号串，针对法国社会的惟一一个消费者，都有特定的值或用途。这个消费者可能是路易十四，或者是旅馆老板雅克，或者是一批具有同样需求的同样的法国人。在这个简单模型里，不存在货币和市场。取代它们的是一位聪明的社会规划者。这名社会规划者的任务是：她知道路易十四的需求（最好如此），她知道这个王国所拥有的可更新资源，她也知道“语法规则”，因此她知道，如果按规划进行，不断演化的技术边疆会是怎样的。她所要做的，就是努力优化国王或者雅克未来的幸福感。在这一点上，简单的经济模型需要有下面这种假定：国王宁愿及时享乐，而不是寄希望于未来。如果他必须等待一年，那么他愿意现在拿 X 份的幸福，换取未来 $X + 6\%$ 的幸福，即使每年都递增 6% 。简言之，国王以特定的比率，将未来的价值打折处理了。雅克也不例外。我们也不例外。

因此，我们这位无比聪明的社会规划者提前考虑到了这种情况，比如可以预见未来 10 个阶段的事情，我们把她的预见称作规划视平线；她考虑到了这 10 个阶段中所有可能产生的技术商品和服务；考虑到了国王在这 10 个阶段中的幸福（打了折扣的）；然后选择一种能尽量让国王满意的规划。这一计划规定在这 10 个阶段中，每种技术上可能的“产品”要生产多少，消费多少，何时消费等等。这些生产活动按照某种比率进行：如冰激凌和葡萄的产量是斧头的 20 倍，如此等等。这一比率实际上就是价格的类比物，每一种商品相当于“货币”。并不是所有这些可能的商品都会被生产出来。耗费资源去生产它们并不能让国王足够幸福。因此，只要我们考虑所涉的商品和服务的效用的时



候，任何时候真正生产出的商品，只不过是技术上所能够生产商品的一部分，而非全部。

现在这位社会规划者实施她的第一年计划，经济在这一年当中按照规划好的进行生产和消费。一年之后，她要做一个新的十年规划，这个规划就是从第二年到第十一年。这里我们刚刚考虑的，就是一个“变动的视平线”社会规划者模型的推进，这个经济模型都按照自己的方式演化，向未来发展。在每个阶段，社会规划者都要提前十年做出规划，选择最优的十年计划，并执行第一年的计划。

当然，这种模型，对事实处理得有些过于简单。但是凭直觉，按照我们的语法体系，我们可以预见这么一个模型会出现何种结果。随着时间流逝，新的商品和服务会创造出来，取代旧产品和旧服务。新的技术形成，旧的技术消失。由于技术网络是联系在一起的，某种商品或服务的消失，会让其他的商品和服务失去存在的意义，也随之消失。每一种商品和服务都代表了一种生活方式，它们来了又去，都曾在社会舞台上活跃过。技术在演化。经济体系中的商品和服务不仅进化，而且也共同进化，因为现存的技术，在由其他已有技术构成的地形中，都必须有存在的意义。

于是这些语法模型为我们研究技术共同进化提供了新的工具。尤其是，一旦我们看到这样的—个模型，就会明显地体会到，经济网络自身促进了自身的演变。我想，凭直觉我们可以了解这一点。只不过从来不曾有一个玩具世界，向我们展示我们所知的一切。一旦看到这样一个模型，一旦清楚地了解到我们置身其中的经济网络在很大程度上控制着自身的演变方向，我们就会想到，了解实际经济生活中的规律的确是非常必要的。

这些语法模型也指出了新的经济起飞因素：多样性可能会导致多样性；因此多样性会导致经济增长。



图 12.4 中的 x 轴显示的是每一个时期法国土地上所出产的属于可再生资源的商品和服务的品种， y 轴表示的是构成互补性和替代性语法或规则的成对符号串的数量。此统计图上的曲线，是我们已经熟悉的分割亚临界和超临界行为特点的曲线。

假设这里的语法规则仅包括一对符号串。假设这时的法国异常贫困，其土地每季仅能出产一种符号串。结果，根据语法规则，因为仅有一种可再生资源，无法利用它制造任何新东西。法国人所能做的，就是消费这唯一的资源。不会出现技术边疆的产品爆炸性增长的现象。依靠艰苦努力，法国人或许可以存下大量的这唯一的资源，这就算不错了。无论如何，不会出现商品品种爆炸性的增长。这一系统处于亚临界状态。

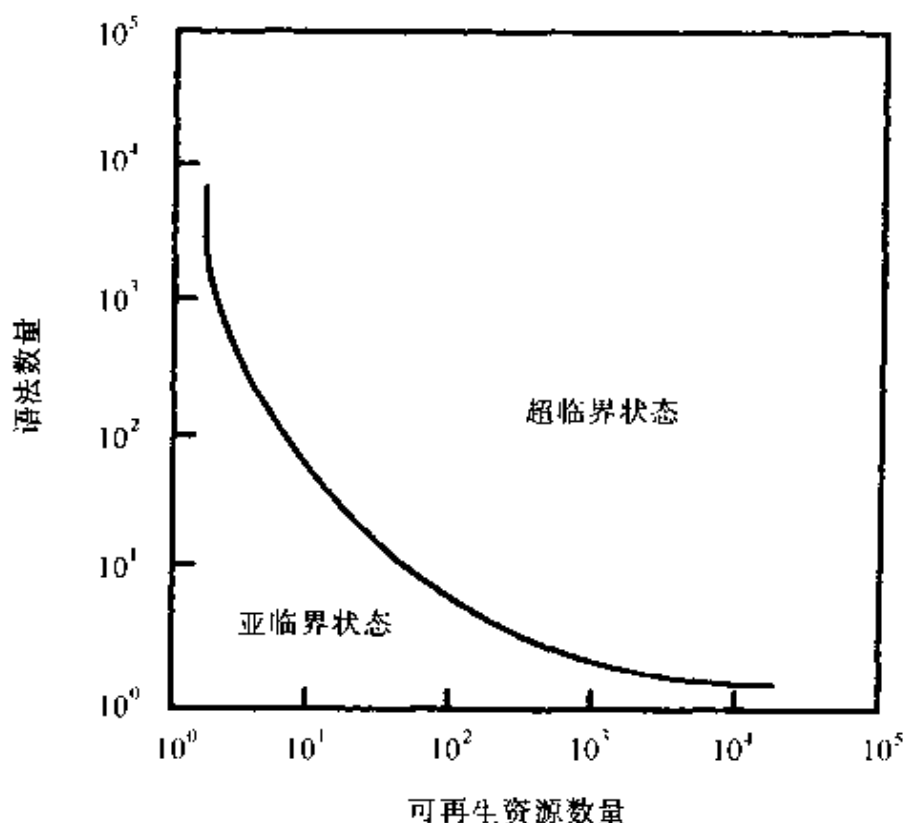


图 12.4 某个经济体系内所赋予的可再生商品数量和表示假定的“替代性和互补性规则”语法中成对符号串的数量之比。曲线下方是亚临界状态，上方是超临界状态。随着可再生资源种类的增加，或者语法规则复杂性的增加，系统产品的多样性呈爆炸趋势。



但设若语法中有许多对符号串，就是说法国的土地肥沃，出产许多种可再生资源。那么，利用这些基本的符号串，使其相互作用，就可以迅速创造出大量的有用产品。回过头来，商品和服务品种的增长，又会导致技术边疆的爆炸性增长。如果社会规划者认为这些东西对国王有用，技术上可能制造的产品和服务的子集就会在复杂的演进中生生灭灭。由多样性引发的经济起飞出现了。该系统处于超临界状态。

如果法国处于亚临界状态，而英吉利海峡对岸英国的情况也一样，那么通过贸易，就可能足以使双方的技术进入超临界状态。这样，就会出现在多样性方面更庞大、更复杂的经济体，这是由于该经济体系允许技术边疆出现爆炸性增长。

此经济模型的行为特征还取决于其中的“折扣”因素和那个社会规划者的洞察力，即她所预见的“规划视平线”。如果国王不愿意为幸福而等待，那么明智的社会规划者就不会取消今天的想喝的牛奶。没有剩余的牛奶用来制造冰激凌。本来可以繁荣多样的经济会受到限制，乐于保持在最初的伊甸园状态。另外一种情况是，不论国王喜欢什么，假如社会规划者都不预先考虑，她也许不会意识到会制造出冰激凌。同样，经济模型也会受到限制，不会呈多样性发展。

虽然经济学家使用的模型带有社会规划者，但是这要比拥有市场和其他贸易经济因素的模型简单多了。在社会规划者模型中，所有经济因素的协调工作，即经济中无形的手所做的工作，都由规划者负责，管理控制不同生产和消费行为的适当比重。在现实世界中，独立的经济因素进行决策，而从中协调它们之间行为的是市场因素。虽然我所使用的社会规划者模型忽略了许多关乎市场发育以及各经济因素协调等方而的重要因素，然而它可以集中揭示技术网络的进化。在这个模型中，我们能看到技术的产生和消亡以及亚临界和超临界行为特征。如果将模型中的规划者



用市场和其他优化的经济因素取代，使模型更接近现实，也会显示出类似的特点，不过这尚待证实。

请不要误解。我不是经济学家。这些语法模型是全新的。至少，目前你应该把它们看作是一种类比。虽然是类比，它们依然显得值得考察。其中有一项，是多样性有可能推动经济增长。

标准的经济增长理论似乎没有考虑到经济元素的多样性和经济增长之间的关系。标准的宏观经济理论经常是假设一个经济体系仅生产一种产品，并以此来建立模型。这惟一的产品是我们所有产品的集合，在论述中，所涉及的也只是供需集合、货币增长、利率以及其他因素的集合。长期的经济增长往往是由两个主要因素造成的：技术进步以及生产力和工人技能的提高，后者称作人力资本或技术资本。一般认为，技术进步是由研发投资引起的。人力资本的增长是由于在职培训方面的投资引起的。这种增长有利于个人利益，或者最亲近的家庭成员等的利益增加。“技术进步”和“人力资本”与技术网络的潜在动力和它们的转换，对此尚未有明确的解释。

这并不是由于经济学家不了解我们所讨论的互补关系等。事实上，经济学家研究过有关经济因素相互作用的复杂的输入-输出模型。但是由于缺乏将其变得更加正式的基本框架，经济学家找不到明显的办法，构建出一种模型，用于探讨不同的经济部门相互联系以及这种联系对进一步的多样化和经济增长所起的作用。但是这种各部门相互之间的关系，其重要性正变得越来越明显。如果这种看法是正确的，那么多样性就应该被看作预测经济增长的一个主要因素。这并不是一个新观点。加拿大经济学家简·雅各布斯（Jane Jacobs）20多年前就在不同的场合阐述支持这一观点。最近，芝加哥大学的经济学家约瑟·辛克曼（José Schenkman），他也是圣塔菲研究院的一个老朋友，在他的工作报告中，强调说明城市的经济增长率和城市的经济部门多样性有着密



切的关系。辛克曼和他的同事精心控制研究模型中的工业资本总额和涉及的部门数量。得出的结论中有某些线索,支持我们这里讨论的显而易见的观点:经济体系的结构本身,是该经济体系将如何增长和转变的最根本因素。

确实,如果我们将前些章讨论过的生物的共同进化和人造产品的共同进化之间的关系比较考虑,探讨其潜在意义,就会产生一些新的,也许有用的有关经济增长各方面问题的理论框架。

我们业已看到,优化充满冲突的问题时,一个特点就是开始进步很快,但是后来速率会呈指数下降。技术学习曲线的众所周知的特点意味着,主要的创新出现之后,先会有一段增长回报期。对技术的一定数额的投资,会极大地提高生产力。后来,随着增长速度呈指数下降,进一步的投资得到的回报又会递减。这意味着,在早期阶段,回报不断增长,资本和信贷会流向这些新部门。如果是这样,重要的创新就会推动它们所创造的部门内资本的形成以及整体的增长。目前,生物科技领域所发生的正是这一情况。后来,随着学习曲线向上移动,市场也趋向饱和,在成熟的经济领域,成长会放缓。

但是随着经济活动的变化,经济共同进化的地形也随之改变。新的一套“相邻”技术会出现并发展起来,在发生了变化的地形中向上攀登。随着飞机设计和发动机马力的增加,定桨式推动器(fixed-blade propeller)就不如新发明的变距螺旋桨(variable-pitch propeller)更有用。就像在变化的地形上的分化发展,新产生的物种一开始相比之下适应性低,新发明的变距螺旋桨开创了一个相对新的时代,让人们学习设计更好的变距螺旋桨。地形的变动会要求新的周边产品和技术的出现,其中的每一种都会带来新一轮的快速学习和快速增长回报,吸引资本和信贷,推动该部门或领域的进一步增长。另外,定桨式推动器使人们边做边学,也会带动周边新技术的发展。人力资源和技能,自



然而然地就会积累起来，其基础不再是个人，或者他的家庭，也不再局限于单个狭窄的技术领域。

在更大的范围内，某个经济系统内不断的创新，其根源是由于该经济系统处于超临界状态。新的商品和服务创造出的地形，引出更多的新产品和创新。每一种都会促进增长，既是因为在学习曲线的早期会有一个回报增长阶段，也是由于新市场的出现。其中一些，的确可以看作是诱发舒彼得所称的“创造性破坏潮”的因素，它们大规模地送走老的技术，迎来新的技术。这种大规模的变化为回报的增加创造出巨大的空间，因为根据新技术发展曲线，在沿学习曲线上升的早期阶段，会有巨大的进展。因此大规模的变化会推动数额巨大的资本形成和增长。其他的技术从出现到消失引不起什么影响。这些区别大约能部分地反映出新技术或新产品，在目前以及经过未来的进化，到底是处于网络的中心还是边缘。汽车和电脑处于中心，而呼啦圈却是在边缘。

我们只是约略描述了一些明显的观点，但这些观点也许值得认真研究。多样性可以带来多样性，推动复杂性的增加。这些观点最终可能会对政策产生某些作用。如果多样性很重要，那么在帮助第三世界国家的时候，帮助乡镇企业发展起来，建立区域性的经济网络，使它们可以相互促进，扎根成长起来，要比建设阿斯旺水坝那样的大工程要好。但是这样的结论尚待证实。希望大家会发现语法模型对于研究技术进化及其在经济增长中的作用是一种很有用的方式。

讨论过经济网络，在做结论之前，我想让人家想象自己是生活在我们刚刚描绘的世界中。如果这样的系统一直都由技术创新，那么什么算作是明智？如果技术的附带产品对于这个星球的具有无法预见的长远影响，那么什么是智慧？贝尔南部公司（Bell South）需要对是否在光纤技术上投入数十亿的资金而做出决策。它是否应该这么做？万一两年之后，有个聪明的孩子，发



明了一种给饮料罐加上风扇，让它们以一定的间隔停留在空中，发现这竟是一种比光纤更好的通讯传输手段，又当如何？数十亿元就白投进去了。贝尔南部公司的管理层面面对不断变化的技术前沿，是否能做出决定？

不。

十几年前，有谁会想到我们今天能够在家里方便地使用传真机？最近，我应邀去离我所在的圣塔菲研究院几百英里外的科罗拉多参加一个有趣的会议。结果去之前我把详细的会议指南给丢了，所以我就给朋友琼打电话，因为她也要参加那个会议。她当时不在家。我在她的录音电话上留了言。十分钟后，她从温哥华岛的北端打电话给我，她去那里是想观察鲸。我告诉了她我面临的问题。几分钟后，她就从温哥华岛给我把会议指南用传真发了过来。老天爷，如今只要你花几百美元买个全球定位仪（GPS），就可以用这玩意儿锁定几颗卫星，确定你在地球上的位置，精确到几十英尺以内。实际的精确程度可以到几英寸以内，但是很明显，美国军方要求此类民用设备的精确度不能达到那么高。今天我又听到一个传闻，是关于日本人的。由于地理位置的原因，他们对地震特别关注，因此在日本国各岛上，设立了固定的全球定位点。这些点之间微小的变化，就能揭示出某些地质变化，这些变化有可能预报地震。我不知道这传言是否属实，但里面确实有可信因素。我们借助对地面上位置及其变化的测量，来猜测下面岩浆的活动，就是说先发上些卫星，再朝它们发上些信号。而哥伦布，当年航海的时候有块磁石，就感到幸运不已了。网络的确是逐渐展开，越来越复杂。

我们不仅是必须通过想象才生活在我们的语法世界的模型中。我们的确生活在这么一个世界中。我们生活在一个自组织的沙丘上，每向上迈一步，都会有沙子流淌下来。我们基本上无从知晓，究竟会发生什么。



全球文明

我们所拼缀起来的文明，从远古到现代，越来越紧密地联系在一起，那么它的将来会是怎样的呢？不论你是否喜欢，某种形式的全球文明正在出现。我们正处于历史的一个特殊时期，人口、技术、经济 and 知识将我们结合在一起。我写作这本书，并不是说我有超常的智慧，我，和大家一样，都是这个正在出现的文明中的一分子。我怀疑，我们是否知道自己正在创造的是什么；是否知道，这一切的根基，都需要我们付出一点点宽容，一点点仁厚之心。我怀疑，我们所创造的政治体制，是否能继续为我们服务。

当西方文明和因纽特文明发生接触之后，后者很快被大幅度改变了。当西方文明和传统的日本文明发生接触之后，后者很快被大幅度改变了。当罗马人和雅典人接触之后，二者都发生了改变。当希腊文化和希伯来文化发生碰撞之后，西方文明的两大基石以新的方式结合起来。当西班牙人和阿芝台克人接触之后，在这个熔炉里，出现了新的混合文化。壁画中怒目而视的凶神，是以西班牙的绘画技巧绘制的。以西方风格织造的挂毯，经常出现危地马拉的地方图样。

现在，所有的文化都在发生碰撞。在新墨西哥的南贝（Nambe）举行的小型会议上，我碰到了 N·斯各特·毛玛代，李·克伦（Lee Cullum）和华尔特·夏皮罗（Walter Shapiro），有个叫做基训基金会（the Gihon Foundation）的组织请我们无所顾忌地发表看法，谈谈当今世界面临的主要问题，我个人最关心的问题就是这个正在出现的全球文明，它将造成的文化断层以及我们是否能够找到一个可行的文化和政治框架。

不知为何，我总是想到我们所讨论的符号串，它们的意象索



绕着我。意识形态改变所产生的旋涡，一波又一波的时尚潮流，日新月异的美食文化，法律条文和案例带来新的法律条文，这一切，我们在语法世界的模型中，在那些有“蛋”、“喷射机”和“蘑菇”的意象中，都似曾相识。随手将一个新的符号串放入芳坦娜的计算机模拟的“锅”中，一堆新符号串就可能产生。小小的混乱可能在符号串系统中导致巨大的变动，抑或什么也导致不了。

我们并不真的知道，凭借直觉我们到底了解了什么。我们不知道河道中的原木，是如何堵塞堆积在一起的，移动其中的某一根，有时只会引起另外一根稍稍动一下；而移动另外一根，虽然它的位置也同样平淡无奇，轻轻拨弄它一下，却会将堵塞在一起的一大堆原木理顺开来，向下游漂去。我们不了解公众世界中一些元素之间的功能的匹配关系，不论是政治的、经济的，还是文化的。

我们缺乏一种理论，为我们解释公众生活中各个元素是如何相互作用又相互改变，联系而成网络的。我们将这些改变叫做“历史”。因此对于历史中的所有偶然事件，不论是生物的还是人类的历史，我们必须一再卷入一场争论：对于历史学，是否有可能存在任何规律？我们能否发现文化、经济以及其他种种的类似规律性的模式，如亚临界和超临界行为特征，或者是形成和灭绝的规律？

我们最好努力去了解这些过程，因为一个全球文明正在到来。我们将目睹它的诞生，不论大家是否准备好了。

对于我们创造的现代民主制度，我们自己对自己讲述其中的历史时，认为这是启蒙运动的产物。是牛顿加洛克的产物。美国宪法，200多年以来，一直在很好地发挥着作用，是基于平衡政治权利的思想而产生的文件。牛顿加洛克的产物。我们创建的政治体制，具备很好的灵活性，既能平衡政治力量，又允许体制



本身的进化。但是我们关于民主政治的理论却很少谈及文化、经济和社会的发展演化。19世纪，历史作为一门科学走到了前台。黑格尔提出了辩证过程的正题、反题与合题。马克思批判了黑格尔的唯心主义，创立了辩证唯物主义。由正题、反题与合题构成的辩证过程，听起来有点像是亿万个物种生死轮回的进化，又有点像是科学技术产生又消失的进化过程。

约翰·梅纳德·史密斯（John Maynard Smith）1992年夏天来圣塔菲研究院参加一个会议的时候，对一伙人讲的一席话让我吃惊不小：“也许你们分析社会变革所采取的都是后马克思主义的方法。”我不知道他指的是什么。历史学家不认为自己仅仅是在重述历史记录，而是在观察一个相互作用，千变万化，并创造出未来的模式的网络。历史学到底是否存在任何“规律”？在工业革命中，各种技术爆发出现，这是否是商品、服务和新的生产技术多样化自我作用，自催化的实例？对于文化变革，如文艺复兴、启蒙运动，又该如何看待？这些事件，是否反映了它们处于一个观点、规范和其他要素自我肯定的系统内？

理查德·道金斯是牛津大学的一位进化生物学家，他使得迷母斯这个词流行开来。最简单的解释，迷母斯是某个群落中被复制的一点行为特征。如今，女士们喜欢把太阳镜像个发卡似的架在额头上。我疑心这一时尚是由奥黛丽·赫本引起，她在《蒂芬尼的晚餐》这部影片中饰演的霍莉·格莱特丽（Holly Golightly）就常这么做。狭义上，迷母斯就是“复制品”，在复杂的文化转变模式中被发明和模仿。但是这个释义未免太狭了。就像是芳坦娜的零级组织，一个复制品会传遍整个群落。是否存在集中的自催化系统，迷母斯的一级组织？文化模式能否被看作自我维持并相互规定的一系列信仰、行为方式和角色？

也许目前它们之间的相似性还很松散，听起来更像是某种比喻，而不是真正的理论。但是，我们难道没有可能是多种此类文



化存在的成员吗？我们发明了概念和分类方法来描述这个世界。是否本来可以用其他方式？发明了分类之后，我们把它应用到这个世界，而我们自己，也被同时分类。由于我们创造了司法系统，我可以签署合同。由于我们都可以这么做，你我就可以建立一个有可能永生不死的人，即公司企业，它的目标就是生存，而且这可能损害它的许多创建者的利益。因此现代企业就是一个自我维持结构，所包含角色和义务“生存”在经济世界中，交换信息和职员，其存在和消亡在某种意义上和埃希杆菌有些相似。埃希杆菌集中起来具有自催化特征，能够自我维持。现代企业似乎也具有自催化功能。埃希杆菌和 IBM 都在各自的世界里进行着共同进化。二者各自都参与创建自己生在其中的生态系统。就像最近庞大的 IBM 也面临困难一样，即使是强者，也会发现它们的世界发生了巨大的变化。

所以说，一种全球文明正在出现。在南贝召开的那个小型会议上，华尔特·夏皮罗（《时代周刊》政论作家）和李·克伦（《达拉斯晨报》的作家），集中探讨了麦当劳餐厅在德国的海德堡这个大学城里的一座古堡的角落里开了一家店面这件事的意义。好的商业政策？可能是。玛丽亚·凡瑞拉（Maria Verela）住在圣达菲北部，距此 80 千米，靠近查玛（Chama）。她在努力争取帮助当地的一个西班牙社区，通过保持他们的纺织手工艺保护其古老的传统。我们只有处于某个文化中，才能在这个世界立足。当地的西班牙文化遭受冲击。看《米拉格罗豆田战》（The Milagro Beanfield War）这部电影的时候，我们既想哭又想笑。故事中自然既有英雄，也有恶棍，但是现实生活中的新墨西哥和其他地区大多数的改变似乎都是文化相互交织相互改变而带来的无可避免的结果。墨西哥薄饼“福希塔”（fajitas）似乎是得克萨斯发明的，不是墨西哥。在纽约，从古巴来的中国人发明了古巴式中餐。



即将出现的全球文明是否会像许多人担心的那样呈现出一致性？人们是否因为当电视流行开来的时候，美国最为强大，因此大家都说英语？人们是否会喜欢汉堡包？天知道会不会，我本人倒是蛮喜欢这东西，也说英语。不过，话又说回来，我可是美国中产阶级的典型分子。

当两种文化传统发生碰撞的时候，新文化符号串是否会在各地涌现？全球文明是否是超临界的？既然可以有古巴式中餐，我们还能发明什么——比如，伊斯兰文化和硬摇滚结合会产生什么？我们是否还将互相杀戮以维护自己的生活方式？当其他民族的迷母斯像光线一样照进，像电子邮件一样涌入我们的客厅和书房，而我们的生活方式被变革带走的时候，我们需要怎样的宽容？

不知为何，可能是它们的意象特别吸引我，我发现自己再次想到波·巴克和沙丘。我发现自己怀疑我们是否真的能发明新的文明，这种新文明像太阳耀斑一样，突然闪现在旧文明冲突碰撞的边缘。我发现自己思考着在我们过去创建的文明内部和这些文明之间，充满了大大小小规模不等的变迁。我深深地担心，人们的多种生活方式会经历一场浩劫，纷纷消亡。人们不再是动辄武力相向。但是我们的确觉得搞出古巴式中餐，或者是将伊斯兰思想和硬摇滚结合起来这样的想法至少是比较有趣。也许我们需要更多的幽默感。也许，当我们真的能做到相互尊重，相互宽容，欢笑能帮助我们疏解压力和紧张局面，当我们相互之间能够讲一些各自种族的笑话时，我们才能确定一个全球文明的确在到来。听了上面的这些忧虑，斯科特·毛玛代回到了他自己的中心论点：在现代社会，我们必须重塑神圣。毛玛代的看法在我们四个中引起了奇怪的感觉：如果一种全球文明正在出现，我们有可能进入这个英雄的时代，创造的时代。当希腊文明在爱琴海沿岸形成的时候，早期的希腊公民创造出他们不朽的神话。我们这四个



被随机选出的“思想领袖”，聚集在新墨西哥的南贝附近，思考着这个正在出现的全球文明，认为它需要创造自己的新的不朽的神话。

当基训基金会举办的这个小小的会议结束时，我们出去吃午餐，俯瞰迈克尔·奈史密斯的花园，远眺南贝北面的群山，华尔特·夏皮罗自嘲道：“新墨西哥山四雄论道，敬告世人自我反省。”

重塑神圣

大约1万年前，最后一个冰期开始消退。冰原逐渐退缩到山顶。在如今法国南部那个地方，马格达林文化衰落了。这个文化曾孕育出拉斯科和枫德戈姆洞窟里的岩画艺术以及旧石器时代早期的燧石、标枪、鱼钩等加工精细的工具。大群的野兽向北迁徙。这些祖先也向北迁徙，留下这些绘画，让我们惊叹不已。

这些山洞内壁上所绘的野牛、鹿等，表达了人类和大自然和谐相处的精神，同时又充满敬畏之情。所有的狩猎场面都不带有暴力。有幅画画的是两头鹿在相互爱抚。从那时起一直到现在，大约1.4万年的岁月中，比勒高省的岩壁上的这两头鹿一直相互关怀。

敬畏之心在我们混乱的后现代社会中不再时髦。斯科特·毛玛代说我们必须重塑神圣。我们的小会1年多以前结束了。我既无毛玛代的雄才大略，也没有他那浑厚的嗓音，更缺乏他那种神秘的权威。我该向谁诉说这些东西？不过是又一个微弱的声音。但是我们从培根那里继承而来的传统，那种对科学威力的崇拜，认为科学可以帮助我们预见将来，掌握现在的想法，不正是这些，使我们永远失去了敬畏之心？如果大自然确实是我们的，供我们支配掌握，我们很可能要为自己的傲慢付出代价。毕竟，权



力会导致腐败。

我的朋友，你甚至连三个成对的钟摆如何运动都无法预言。你也不知道三个相互施加引力作用的物体如何运动。我们在农作物上喷洒杀虫剂，昆虫受到毒害，被鸟儿捕食，鸟儿因此得病死亡，又导致害虫大量增生，到头来还是作物被毁。这么多要管的事。培根啊培根，你的确聪明绝顶，但是这个世界要比你的哲学更加复杂。

以为自己有最高的学问，怀着最好的目的，便以为自己是来支配自然的。以为自己能开采资源，不论是可再生的，还是不可再生的，均取之用之，便以为自己可以随心所欲地霸占。我们不知道自己在做什么。如果当年维多利亚时期的英国，那个不可一世的日不落帝国，当真将自己看作是促进世界不断进步的领袖，而认为科学可以带给人类无尽的福祉，那我们现在是否还能这样来看待自己？

我们怀疑自己。一直如此。浮士德和魔鬼做成了交易。弗兰肯斯坦创造了毁灭自己的魔鬼。普罗米修斯散播了火种。我们看到自己点燃的火种漫出了我们设计的炉膛。我们开始意识到，骄傲的人类，也是一种野兽，仍旧孕育在自然之中，仍旧需要一个更强音代我们鼓噪辩护。

如果我们对自已最好的行动所能产生的后果依然充满忧虑，这却是一种智慧。智慧并不是对神俗两界的事摆出确信的姿态。我们共同创造了这个世界。我们所能做的，就是在自己所处的小范围内，尽量地聪明，即使我们最好的努力，最终结果却是改变我们的地形，使我们的生存方式变得不可预测。在生命的舞台上，我们或昂首阔步，或手足无措，就游戏这一个钟头，而这却是生命戏剧中属于我们自己的惟一的角色。因此，我们要不卑不亢地演好这场戏。

既然我们最好的努力，最终结果却无法预测，那还努力强争



做甚？因为，这世界就是这样，而我们是这世界的一部分；因为生命就是这样，我们是生命的一部分。我们这些后来的演出者，是历经了 40 亿年的生命演化的继承者。我们深深地参与其中，如果这还不值得报以敬畏之情，如果这不是神圣，还会是什么？

若是科学让我们失去了西方的伊甸园，在那里，我们是世界的中心，上帝的子民，日月运行，鸟翔于空，兽栖于野，鱼游于水，一切都是为了我们的福祉，而今被遗弃在这里，漂流到另一个单调的星系的边缘，也许是该打起全副精神振作以对了。

如果我们讨论的生命发生的理论有什么价值的话，也许能说明我们是处于一个自己并不了解的宇宙中。不了解，是由于我们所知过少，连怀疑都无从谈起。我不知道本书中所谈的生物发生与发展的故事能否被证明是真实的。但这些故事并不是空口说白话。它们是一个新的科学领域的片段，这门科学将会在未来的岁月中，对我们置身其中的这个宇宙，我们这个远未达到平衡的家园中生命和秩序的产生，提供新的见解。我不知道生命是否像我试图阐释的那样，是由地球早期不可避免地形成的有机分子聚集在一起产生的。哪怕说这种聚集形成是可能的，也会令我们振奋不已。我宁愿相信生命是宇宙大爆炸之后通过这种方式形成的，也不愿意相信穷宇宙之终生，尚不足以导致生命的形成。我不知道遗传规则数学模型中所表现出的自然产生的秩序，是否是个体发生中秩序的根源。我兴奋地意识到，进化也许是自然选择和自发秩序相结合的产物。我兴奋地意识到，生物可能并非一个又一个精巧的装置堆砌起来的产物，而是生命中所蕴含的更深刻的内在秩序的反映。我无法确定，民主制度的产生，能够使意见和利益相冲突的各方达成理智的妥协，但仍然兴奋地意识到，我们的社会组织可能是由一种深刻的自然规律推动进化的。爱因斯坦说：“上帝狡猾，但并无恶意(the Lord is subtle, but not malicious)。”



我们还只是刚刚开始建立这一门科学，这门科学将揭示我透过窗户所看到的正在演化的自发的秩序，从结网的蜘蛛，到山脊上狡猾的野狼，从我和我在圣塔菲研究院以及其他地方的朋友们（正是我们这些人自豪地期待着自己会揭开某些秘密），到所有尽心尽力生活的读者诸君。

我们都参与到这个过程中，由它创造，并创造它。最初是那个词——规则。接下来的都紧随其后，我们也参与进来。几个月前，我和妻子遭遇车祸，身受重伤，这是自那以来我第一次自己登上了一个山顶。我是跟菲尔·安德森一起爬的山，他是我的一位好友，曾获诺贝尔物理学奖。菲尔对探矿找水很在行。记得有一次看到他从树上折下一根小树枝，掂着它越过山头，我曾感到很诧异。这次我也折下一根树枝，跟着他走。只要他拿树枝点点地，我也点一点。后来，我发现他走到我前面去了。我问：“找到了？”“当然，世界上有一半的人会找矿。”“那你有没有挖过你找到的地方？”“哦，没有。对了，有一次。”这时我们来到了山顶。里约格兰德山谷（Rio Grande Valley）在我们脚下向西伸展，佩科斯荒野（Pecos Wildnerness）向东伸展，而特鲁卡斯（Truchas Peaks）的峰峦在背后矗立着。

我说：“菲尔，要是有人在生命的演化中看不到灵性，体会不到敬畏之情，就是个傻瓜。”而我的这位探矿专家，现在已经成了无神论者的朋友回答说：“我不这么看。”他看了一眼天空，祈祷说：“为了伟大的非线性天空图。”



译后记

本来，这篇译后记，是要由我的老师，李绍明先生来写的。可他非要我来写——你说，如今这世道，老师逼学生做事情，学生敢不从命？

认识绍明老师是在他讲授的翻译欣赏课上。早就听说过他的才华横溢、他的愤世嫉俗。于是带着 100 度的热情去听他的课，而且这热情随着听课次数的增加而与日俱增。也早就听说他爱才，每届学生里面，凡有一二可取者，他均念念不忘，将这些可取者的一二可取之处，给后来的学生娓娓道来，变成十二分的可取。莫名地，我竟然也成了这可取者中的一员，绍明老师不顾我屡次翘课，屡次不交作业，抓住我习作中的一二小聪明不放，逼我和他交流翻译心得，渐渐地，竟成了挚友。于是，当他邀我共同翻译考夫曼的《宇宙为家》的时候，我已然被他的抬举弄得飘飘然，欣欣然地便应许了。

待拿到原书之后，慢慢读来，我才意识到自己多么鲁莽，多么不知天高地厚。在考夫曼面前，我不仅仅生物学知识、复杂性科学知识不过关（实际上几乎等于零），就连学了十几年的英语，竟也是不过关的。考夫曼时而不疾不缓，将进化论的知识条分缕析地掰出；时而激情澎湃，将他心目中复杂性科学的前景展现在读者面前。面对他收放自如的行文，我真有要退却的打算。



然而绍明老师由不得我退，每次和我通电话，都要查问工作的进度。而我，则只有把已做的工作，乘以二或三，报告给他。就这样被他催逼着，一步一步地，竟然也渐渐进入了考夫曼的境界，开始了解他和他所做的工作。而这，是一种怎样的了解啊。

一直以来，我的生物学知识，进化论知识，就是局限在初中生物学课本上介绍的那一点。一直以来，我就以为进化论毫无疑问是正确的、唯一正确的关于生物形成的理论，它完美无缺，证据凿凿。是从考夫曼这里，我才发现，进化论原来面临如此巨大的挑战。本来我以为考夫曼要推翻进化论了，然而不，他以其在复杂性理论方面具有创见性的思考，为进化论提供了新的有力的支持。自考夫曼之后，我相信我心目中的进化论，就不再是廉价获得的可以随意丢弃的东西了，而是我一生要坚信不疑的理论。我把自己的这种体会写在这里，是希望有更多的读者朋友，能从考夫曼这里，获取思考的动力。而不再会在顷刻间，被什么稀奇古怪的说法，把自己头脑中的正确的理论（可惜是廉价获取的）给推翻。想一想，社会上的一些有关信仰的现象，固然有阴谋者惯施阴谋的成分在内，反过来想，又和很多人头脑中的理论和信仰获取得过于廉价何尝没有关系？一个通过课本被教会的信仰，顷刻间被另一种披着美丽伪装的信仰所推翻，还是什么奇怪的事情吗？

读考夫曼，读这套丛书中的任何一部，读者朋友所获取的营养，除了书中的知识之外，更重要的，是每位作者的思维方式。正是这样的思维方式，使我们能够重新梳理心中的信仰，知道自己该坚信什么，该抛弃什么；该敬畏什么，该蔑视什么。

最后，是要说一说感谢和抱歉的话。

感谢绍明老师的催逼，使我得以了解考夫曼，得以参与到翻译考夫曼这件美丽的大事中来。而抱歉的是，由于是译者，这种



了解本应比其他读者深入一层。我虽然努力又努力，但终究无法全盘将读到的考夫曼奉送到读者面前——这里要明确的是，书的第一章至第七章是绍明老师译的，而第八章至第十二章是我译的。绍明老师是译界高手，他翻译起来是得心应手；而我是新手，翻译起来，才发现理论上所谈的种种，又是“信达雅”，又是“形神兼备”，全不顶用。我挣扎着想要做到的，就是把我读到的、读懂的那部分考夫曼，说与读者诸君。幸好不少朋友认为我写中文基本能“达意”，因此不会落入绍明老师所鄙视的一类人，即那些中文不怎么地，翻译理论一大堆，做起翻译来，对任何优秀的作者都是“格杀勿论”的人。希望考夫曼没有被我生吞活剥，阿弥陀佛。

感谢我的妻子和父母。他们给我的翻译提供了最好的条件。2001、2002 之交的整个冬天，我蜷缩在书房里，每天工作八小时，由于他们的照顾，我衣食无忧，才能有此书后半部的成果——希望是善果，阿弥陀佛。

徐 彬

2002 年 8 月